

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 ——对地壳演化的制约和思考

汪 洋^{1,2}

WANG Yang

1. 中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

1. *Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China;*2. *School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

摘要:根据中国东部上地壳区域元素丰度研究和新疆北部地区1:20万化探成果,总结了23个二级大地构造单元出露地壳的元素地球化学特征。与全球大陆上地壳元素丰度值的对比显示,中国大陆出露地壳成分演化程度介于岛弧与成熟的加拿大地盾之间。华北、扬子地台由于含大量碳酸盐岩地层,其出露地壳 SiO_2 含量偏低,明显富集CaO和MgO,可见在出露地壳和上地壳元素丰度值研究中不应忽视碳酸盐岩的贡献。相对于最新发表的2种全球大陆上地壳平均成分模型,中国大陆出露地壳系统亏损Au、Hg、Mo、Sn和W,表明现有上地壳模型过高地估计了Au、Hg、Mo、Sn、W等元素丰度值。华北地台及其南缘的秦岭—大别山造山带出露地壳具低 $\mu(^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb})$ 值(<8)特征,但其他地区 μ 值较高,暗示华北地台及其周边地区出露地壳的低 μ 值特点不具备全球意义。鉴于中国大陆内部各构造单元之间出露地壳成分的显著横向差异,以华北地台为主体的上地壳成分模型目前尚无充分理由作为中国和全球大陆上地壳平均值的可靠代表。

关键词:地球化学;元素丰度;出露地壳;中国大陆**中图分类号:**P591+.1;P595**文献标识码:**A**文章编号:**1671-2552(2005)10~11-0906-10

Wang Y. Comparison of element abundances between the exposed crust of the continent of China and the global average continental upper crust: Constraints on the crustal evolution and some speculations. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(10-11):906-915

Abstract:Based on the results of the study of regional element abundances in eastern China and 1:200000 geochemical survey in northern Xinjiang, the element geochemical characteristics of the exposed crust in 23 tectonic units of the continent of China are summarized. Comparison with the global average abundance of the upper continental crust, the exposed crust of the continent of China is compositionally more evolved than the upper crust of the island arc but less evolved than the mature Precambrian Canadian shield. The exposed crust of North China and Yangtze platforms has a lower SiO_2 content but markedly higher CaO and MgO contents due to the presence of widespread carbonate strata, which suggests that we should not neglect the contribution of carbonate rocks in the study of the exposed crust and the element abundances of the upper crust. In comparison with two recently published average compositional models of the global upper continental crust, the exposed crust

收稿日期:2005-04-28;**修订日期:**2005-08-10**基金项目:**国家自然科学基金项目(No.40376013, 40104003)、中国博士后科学基金、中国科学院王宽诚博士后奖励基金和中国科学院南海海洋研究所边缘海地质与古环境开放室基金课题(BYH02A03)联合资助。**作者简介:**汪洋(1969-),男,博士,从事火成岩岩石学和地球化学方面的研究。E-mail:allen_thalassa@sina.com

of the continent of China is depleted in Au, Hg, Mo, Sn and W, which suggests that the abundances of Au, Hg, Mo, Sn and W in the present global models are over-estimated. The exposed crust of the North China platform and the Qinling-Dabie orogenic belt to its south has lower μ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) values (<8), but other regions of China mainland exhibit much higher μ values, which implies that the low μ feature of the North China platform and its adjacent regions does not have global significance. Considering the apparent lateral variation in composition of the exposed crust for the tectonic units of the continent of China, there is no adequate reason to take the average upper crustal compositional model of the North China platform and its adjacent regions as the reliable representative of the Chinese and global continental upper crustal composition.

Key words: geochemistry; element abundance; exposed crust; continent of China

自Clark、Washington和Goldschmidt的开创性工作以来,地壳化学成分的研究一直是近代地球化学研究的重要课题之一。20世纪90年代中后期先后发表了数种基于现代分析技术测试结果的全球陆壳平均成分模型^[1-3],中国科学家也对此问题做出了自己的贡献^[4-6]。在陆壳平均成分模型中,根据出露地表岩石的系统采样和分析而得到的出露地壳成分及由此推断的上地壳成分模型是相对最为准确和易于横向对比的。同时,在环境和资源问题日益突出的当代社会,出露地壳成分的研究越来越具备现实意义。这是因为当前和可预见的未来,人类社会最主要的活动区域仍然局限于地表——固体陆壳的表层,而支撑现代工业社会的主要固体矿产品依然主要来自赋存于地表以下1~2 km深度内的矿床。因此,出露地壳成分模型可以为研究固体地表化学元素污染、土壤微量元素与地方病的关系、矿产资源潜力评价等环境地学和资源地学问题提供重要的背景参考指标。

本文基于上述中国东部上地壳区域元素丰度研究^[4]和新疆北部地区1:20万化探成果^[7],对中国大陆东部和新疆北部23个二级大地构造单元出露地壳与2001年以来发表的最新全球大陆上地壳化学成分进行比较,以求揭示中国大陆出露地壳化学成分成分的横向差异,进而探讨其地壳演化意义。

1 区域范围、数据来源和对比标准

本文涉及的区域包括新疆北部的天山造山带、阿尔泰山带、东准噶尔地区和西准噶尔地区^[7],东北部内蒙古—兴安褶皱带、吉黑褶皱带,华北地台的内蒙古地轴、燕山带、辽东台隆、山西台隆、鲁西台隆、胶东台隆和豫西台隆,秦岭—大别山造山带(含北秦岭、南秦岭、西秦岭和大别山),扬子地台的下扬子地块、江南地块、宜昌—神农架台褶带和龙门—大巴台褶带,华南褶皱系的东南沿海火山岩带、闽西—赣南褶皱带^[4],共23个二级大地构造单元。

涉及的氧化物和元素共39种,包括10种氧化物:SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、TF₂O₃、MnO、MgO、CaO、Na₂O、K₂O、P₂O₅和29种微量元素:Ag、As、Au、B、Ba、Be、Bi、Cd、Co、Cr、Cu、F、Hg、La、Li、Mo、Nb、Ni、Pb、Sb、Sn、Sr、Th、U、V、W、Y、Zn、Zr。其中氧化物丰度值为质量百分数,Ag、Au、Hg丰度值为10⁻⁹,其他元素丰度值为10⁻⁶。新疆北部的数据来自参考文献[7],中国东部各单元则采用鄢明才等^[4]含碳酸盐岩地层的出露地壳元素丰度数据,但对各单元的10种常量元素,均按氧化物之和

为100%进行归算(即求去挥发分后的值)。各二级大地构造单元出露地壳的成分数据列于表1。地壳元素丰度是依据各类岩石分布比例而加权求得的,不是指某种具体岩石类型的元素含量。本文的目的在于探讨出露地壳整体而非某种具体岩石类型的横向成分差异。由于新疆北部各单元数据均是按面积均匀采集的^[7],中国东部各单元数据是依据区域内各时代地层、岩浆岩和变质基底的比例关系进行大规模系统采样后,采用组合样分析的结果^[4],所以,表1的数值能够代表各单元出露地壳的元素丰度。因本文的目的之一是探讨出露地壳化学成分成分的横向变化,故未对一级大地构造单元的平均成分进行比较。

为了直观地表示中国大陆东部和新疆北部出露地壳的元素丰度值的高低,笔者将其分别按McLennan^[8]、Rudnick等^[9]的全球大陆上地壳丰度值进行归一化处理,以表示丰度值的相对高低关系(图1、图2)。

之所以采用上地壳丰度值进行对比,理由有三。首先,建立全球大陆上地壳成分模型主要依据大陆出露地壳的系统采样分析结果^[1-6,8-10],两者之间具备非常高的相关性,部分研究者将其研究区出露地壳的平均成分直接视为上地壳的成分(如参考文献[10])。其次,由于下地壳与出露地壳、上地壳在成分上存在相当大的差异^[1-3,9],采用地壳整体平均成分模型作为参考值,对彰显研究区出露地壳的成分特征及其横向差异而言不如上地壳成分模型。第三,由于能够直接代表下地壳成分的剖面 and 岩石包体出露稀少和分散,加之不同研究者建立下地壳岩石学模型方法上的差别,下地壳化学模型较上地壳而言,不同模型之间的差异带有更多的主观因素。例如,对于丰度值大于1×10⁻⁶的元素,Wedepohl^[3]与鄢明才等^[4]的地壳整体成分值相当接近,而Wedepohl^[3]与Taylor等^[11]的模型差别较大^[11]。由于鄢明才等^[4]采用的分析方法的检测灵敏度更高,因此从表面上可以得出比Wedepohl^[3]的数据更为可靠的结论。但实际上,Wedepohl^[3]采用中性岩成分下地壳,与Taylor等^[11]的基性岩成分下地壳相比差异很大,所以两者的全地壳元素丰度值差别较大;而对于上地壳成分而言,Wedepohl^[3]与Taylor等^[11]两模型的元素丰度值是相当接近的。

笔者采用McLennan^[8]和Rudnick等^[9]2种丰度模型作为参考值的理由是:McLennan^[8]的模型是Taylor等^[11]的模型的最新改进,其常量元素和部分微量元素丰度值主要基于加拿大地盾出露地壳的数据,稀土元素来自后太古宙页岩的丰度值;

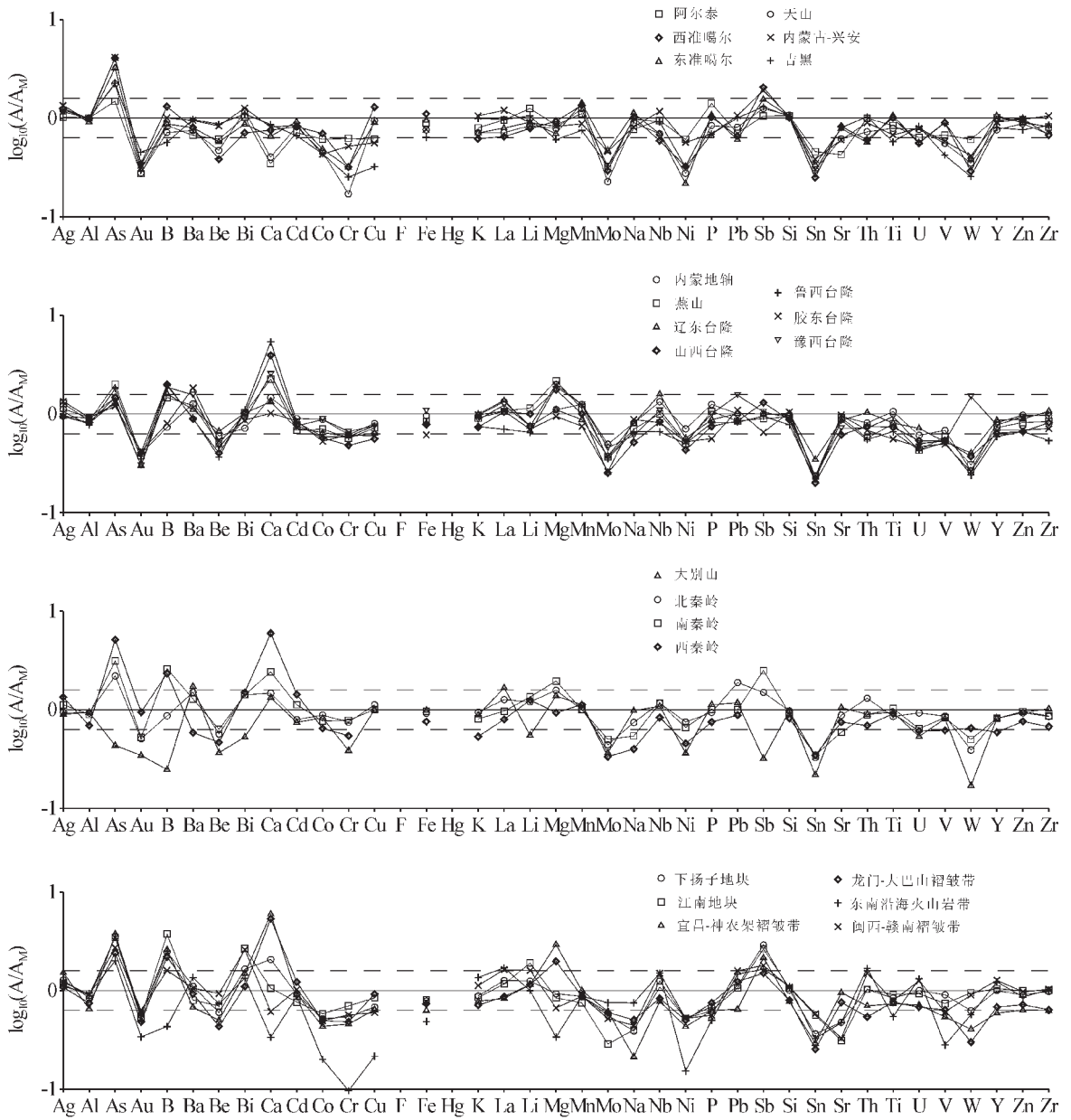


图1 中国大陆东部和新疆北部出露地壳与McLennan的上地壳元素丰度值的比较
Fig.1 Comparison of element abundances between McLennan's upper crust model and the exposed crust of the eastern and northwestern parts of the continent of China
A—丰度值, A_M—McLennan的上地壳丰度值;虚线处log₁₀(A/A_M)绝对值等于0.20

而Rudnick等^[9]的模型更多地考虑了中国中东部上地壳^[5]和日本岛弧上地壳(出露地壳)^[10]的研究成果,较McLennan的模型包含更多显生宙造山带上地壳成分的信息。在表1中还列出了Shaw等^[12]的加拿大地盾和Togashi等^[10]日本岛弧出露地壳的成分。这样,从Togashi、Rudnick、McLennan到Shaw的模型,大致代表了从活动岛弧到稳定地盾的上地壳成分演化序列。

2 出露地壳地球化学特征

2.1 元素丰度值特征

与McLennan^[9]的上地壳成分模型相比(表1、图1),中国大陆古亚洲褶皱系(新疆北部和内蒙古—兴安褶皱带、吉黑褶皱带)出露地壳的多数元素丰度与前者的log值偏差的绝对值小于0.20,但明显亏损Au、Co、Cr、Mo、Ni、Sn和W,略亏损Be、

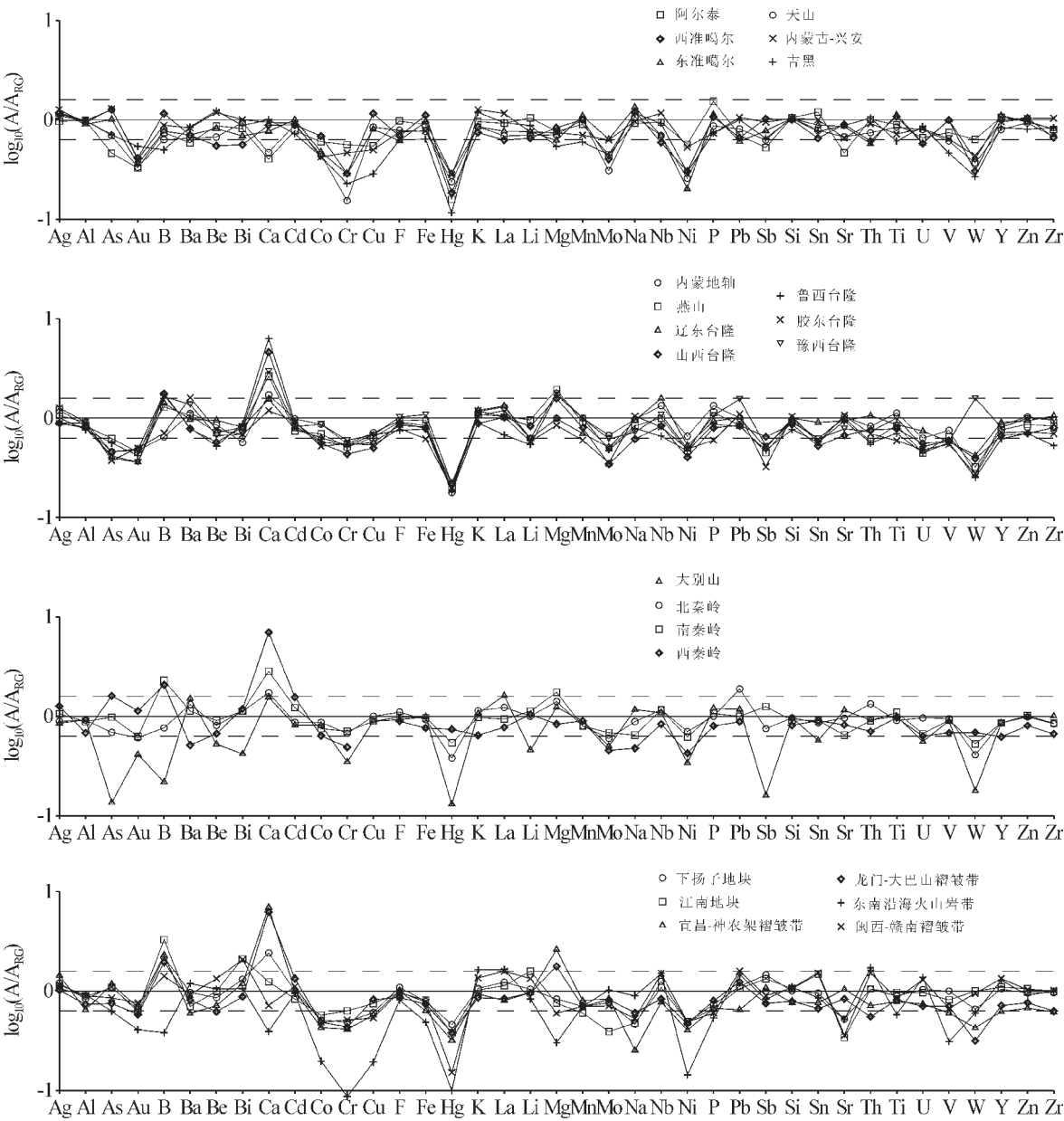


图2 中国大陆东部和新疆北部出露地壳与Rudnick等的上地壳元素丰度值的比较

Fig.2 Comparison of element abundances between Rudnick and Gao's upper crust model and the exposed crust of the eastern and northwestern parts of the continent of China

A—丰度值, A_{RG}—Rudnick等的上地壳丰度值;虚线处log₁₀(A/A_{RG})绝对值等于0.20

Sr、V,而明显富集As,略富集Sb。华北地台内部各单元出露地壳则呈现富集As、B、Ba的趋势,而亏损Au、Be、Mo、Sn和W(但豫西台隆W丰度高),略亏损Co、Cr、Ni、Ti、U;燕山褶皱带、山西台隆、鲁西台隆和豫西台隆明显富集Ca、Mg。秦岭造山带出露地壳表现出富集As、Sb、Ca、Mg,亏损Mo、Sn、W,略亏损Au、Be、Cr、Ni的特点;大别山造山带则强烈亏损As、Au、B、Be、Bi、Cr、Ni和Sb。华南地区大多数内部构造单元出露地壳

明显富集As、Sb和B,略富集Bi、Li,亏损Au、Sn和Na,具亏损Be、Co、Cr、Fe、Ni、Sr和W的趋势;下扬子地块、宜昌—神农架台褶带和龙门—大巴台褶带明显富集Ca、Mg;而东南沿海火山岩带除富集As、Sb外,明显亏损Au、B、Ca、Co、Cr、Fe、Mg、Ni、Sn、Ti和V。

与Rudnick等^[9]的上地壳成分模型相比(表1、图2),古亚洲褶皱系出露地壳明显亏损Au、Cr、Hg、Mo、Ni和W,具亏损

Co、V的趋势,但As、Sb无富集趋势,在某些单元甚至表现为略亏损。华北地台亏损As、Au、Hg、Mo和W(豫西台隆W除外),略亏损Cr、Sb;燕山褶皱带、山西台隆、鲁西台隆和豫西台隆仍然明显富集Ca、Mg,但亏损U。秦岭造山带出露地壳富集Ca、Mg,亏损Hg,略亏损Be、Co、Cr、Mo和W;大别山造山带则强烈亏损As、Au、B、Be、Bi、Cr、Hg、Sb和W。华南地区出露地壳略富集Bi、La、Li和Pb,亏损Hg、Ni,略亏损Au、Co、Cr、Sr和W;下扬子地块、宜昌-神农架台褶带和龙门-大巴台褶带富集Ca、Mg;东南沿海火山岩带明显亏损Au、B、Ca、Co、Cr、Fe、Hg、Mg、Ni和V。

综合来看,中国大陆东部和新疆北部地区出露地壳与全球大陆上地壳平均成分相比具有如下特征:①Au、Hg、Mo、Sn和W丰度表现为系统偏低的明显特征,这应当与现有上地壳成分模型中这些元素的丰度值估计不准确有关(详见下文讨论);②Co、Cr、Ni和V丰度值整体偏低;③发育大量碳酸盐岩地层的构造单元高度富集Ca、Mg;④As、Sb的富集程度介于McLennan模型与Rudnick模型之间;⑤华北地台具有亏损U的特点。

2.2 元素比值特征

为了更好地表示中国大陆东部和新疆北部地区出露地

表1 中国大陆部分构造单元出露地壳的成分

Table 1 Composition estimates of the exposed crust for different tectonic units in the continent of China

	阿尔 泰褶 皱带	西准 噶尔	东准 噶尔	天山 褶皱 带	内蒙 古-兴 安褶 皱带	吉黑 褶皱 带	内蒙 地轴	燕山 褶皱 带	辽东 台隆	山西 台隆	鲁西 台隆	胶东 台隆	豫西 台隆	大别 山
样品数	1114	786	939	966	178	134	237	218	227	267	111	83	64	30
SiO ₂	69.84	66.57	68.76	70.50	68.77	68.69	64.49	61.47	66.37	57.50	51.21	68.92	60.42	63.90
TiO ₂	0.57	0.69	0.72	0.54	0.46	0.39	0.72	0.54	0.55	0.50	0.45	0.38	0.64	0.64
Al ₂ O ₃	15.21	14.99	13.87	15.13	14.32	15.05	14.05	12.92	13.81	12.44	11.77	13.97	12.25	14.24
Fe ₂ O ₃	5.01	6.21	5.32	4.28	4.33	3.58	5.38	4.71	4.57	4.41	4.35	3.46	6.06	5.53
MnO	0.09	0.10	0.11	0.10	0.07	0.06	0.10	0.09	0.07	0.08	0.10	0.06	0.10	0.09
MgO	1.89	2.06	1.54	1.75	1.83	1.34	2.46	4.82	2.45	3.92	4.22	2.10	4.44	3.06
CaO	1.45	3.16	2.75	1.69	3.39	3.61	6.16	9.48	5.57	16.54	22.68	4.27	10.64	5.56
Na ₂ O	3.02	3.96	4.38	3.50	3.16	3.81	3.17	2.74	3.12	2.01	2.58	3.42	2.36	3.81
K ₂ O	2.69	2.08	2.38	2.39	3.55	3.35	3.26	3.06	3.35	2.48	2.51	3.31	2.95	2.98
P ₂ O ₅	0.23	0.16	0.17	0.13	0.11	0.11	0.20	0.17	0.14	0.12	0.13	0.09	0.16	0.18
Ag	51	63	63	60	67	58	56	64	47	47	53	67	47	45
As	2.2	6.1	4.8	3.3	6.2	3.4	2.2	3.0	1.9	2.2	2.7	1.8	2.0	0.65
Au	0.49	0.62	0.54	0.50	0.60	0.81	0.71	0.68	0.54	0.73	0.63	0.75	0.54	0.62
B	12.6	19.6	13.0	10.7	15	8.5	11	22	24	30	29	12	28	3.7
Ba	367	440	442	412	520	530	700	670	610	490	500	1010	860	946
Be	1.8	1.2	1.7	1.4	2.5	2.6	1.8	1.5	2.0	1.2	1.1	1.6	1.4	1.1
Bi	0.13	0.09	0.11	0.15	0.16	0.14	0.091	0.13	0.13	0.13	0.14	0.11	0.11	0.067
Cd	0.07	0.08	0.09	0.08	0.083	0.065	0.088	0.067	0.07	0.076	0.081	0.083	0.074	0.073
Co	10.4	11.8	8.3	7.7	7.3	7.4	15	12	11	9.7	10	9	15	14
Cr	52	26	26	14	43	21	51	47	49	40	49	51	55	32
Cu	15.3	32.4	22.5	23.5	14	8	20	18	16	14	19	15	19	25
F	542	381	344	437	420	350	525	510	470	500	420	440	570	515
Hg	7.9	9.3	14.3	11.9	14	5.8	8.9	9.9	9.4	11	9.1	10	11	6.5
La	28.7	19.4	23.8	21.4	36	29	40	32	41	31.5	21	32	37	50
Li	25	16	18	17	18	21	15	23	15	20	13	14	15	11
Mo	0.49	0.44	0.70	0.34	0.69	0.49	0.74	0.55	0.56	0.38	0.53	0.39	0.68	0.55
Nb	11.3	7.1	8.3	8.3	14	11	16	12	19	10	7.9	9.8	13	13
Ni	27	14	10	12	25	14	31	22	25	19	22	23	23	16
Pb	11.9	11.2	10.3	13.7	18.0	17.0	17.0	14.4	17.2	14.4	14.0	18.6	26.4	20.0
Sb	0.21	0.41	0.31	0.25	0.38	0.26	0.20	0.18	0.20	0.26	0.19	0.13	0.21	0.064
Sn	2.5	1.4	1.8	1.6	2.1	1.6	1.3	1.3	1.9	1.1	1.2	1.2	1.3	1.2
Sr	149	288	274	215	210	280	330	320	300	215	300	340	250	368
Th	10.6	6.4	6.1	7.8	9.6	11	8.7	6.1	11.1	8.0	5.9	7.3	7.7	9.6
U	1.78	1.56	1.58	2.15	2.2	2.3	1.7	1.2	2.0	1.5	1.2	1.3	1.4	1.5
V	72	96	97	59	62	45	73	63	56	57	55	53	57	87
W	1.21	0.58	0.76	0.70	0.83	0.51	0.53	0.61	0.80	0.74	0.48	0.52	3.00	0.34
Y	22	21	23	17	20	17.5	18	16	19	14	13	15	17	18
Zn	65	70	63	62	69	54	69	58	63	47	47	49	67	67
Zr	154	128	156	130	200	160	183	160	203	155	102	135	186	194

续表 1

	北秦 岭	南秦 岭	西秦 岭	下扬 子地 块	江南 地块	宜吕- 神农 架台 褶带	龙门- 大巴 台褶 带	东南 沿海 火山 岩带	闽西- 赣南 褶皱 带	McLennan (2001)	Rudnick et al (2004)	Togashi et al (2000)	Shaw et al (1986)
样品数	89	114	61	314	109	61	39	158	212				
SiO ₂	64.18	60.70	53.96	66.81	70.36	50.98	52.65	72.89	71.55	66.00	66.60	67.52	64.93
TiO ₂	0.58	0.70	0.62	0.57	0.62	0.50	0.52	0.37	0.54	0.68	0.64	0.62	0.52
Al ₂ O ₃	14.12	13.63	10.48	12.8	13.59	9.92	11.32	14.19	13.84	15.19	15.40	14.67	14.63
Fe ₂ O ₃	5.18	5.41	4.26	4.4	4.53	3.54	4.13	2.73	4.33	5.62	5.60	5.39	4.42
MnO	0.08	0.08	0.09	0.07	0.06	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08	0.10	0.11	0.07
MgO	3.49	4.33	2.07	2.06	1.87	6.49	4.39	0.75	1.48	2.22	2.48	2.53	2.24
CaO	6.16	10.17	25.05	8.68	4.44	24.96	22.44	1.41	2.57	4.20	3.59	3.9	4.12
Na ₂ O	2.89	2.11	1.56	1.52	1.56	0.83	1.97	2.93	1.73	3.90	3.27	2.72	3.46
K ₂ O	3.18	2.72	1.80	2.98	2.87	2.62	2.40	4.58	3.79	3.37	2.80	2.42	3.10
P ₂ O ₅	0.15	0.16	0.12	0.11	0.10	0.10	0.12	0.08	0.09	0.16	0.15	0.12	0.15
Ag	47	56	67	64	57	76	54	55	61	50	53	-	-
As	3.3	4.7	7.7	5.3	5.2	5.6	3.6	3.0	4.1	1.5	4.8	6.8	-
Au	0.91	0.94	1.70	0.93	0.97	1.03	0.87	0.61	1.14	1.8	1.5	-	1.81
B	13	39	35	37	56	39	33	6.5	24	15	17	-	9.2
Ba	828	707	322	608	439	373	509	748	581	550	628	458	1070
Be	1.7	1.9	1.4	1.8	2.1	1.5	1.3	2.2	2.8	3	2.1	-	1.3
Bi	0.18	0.18	0.19	0.21	0.34	0.19	0.14	0.17	0.33	0.127	0.16	-	0.035
Cd	0.078	0.11	0.14	0.09	0.075	0.09	0.12	0.085	0.10	0.098	0.09	-	0.075
Co	15	13	11	8.8	9.9	7.4	8.4	3.4	8.4	17	17.3	15	12
Cr	62	65	45	45	58	38	40	8	47	83	92	84	35
Cu	28	25		17	21	16	23	5.4	15	25	28	25	14
F	614	545	497	607	536	561	482	452	546	-	557	-	500
Hg	19	27	37	23	19	16	19	5	7.6	-	50	-	96
La	38	29	24	38	35	25	26	51	49	30	31	21.7	32.3
Li	24	27	25	25	38	23	23	20	32	20	24	-	22
Mo	0.66	0.75	0.50	0.84	0.43	0.92	0.90	1.13	0.78	1.5	1.1	-	-
Nb	14	14	10	15	13	9.3	10	18	18	12	12	9	26
Ni	33	29	20	23	23	19	22	6.7	23	44	47	38	19
Pb	32	17	15	19	18	11	21	25	27	17	17	16.9	17
Sb	0.3	0.5		0.58	0.53	0.43	0.30	0.33	0.36	0.2	0.4	0.61	-
Sn	1.8	1.9	1.9	2	3.1	1.6	1.4	1.8	3.2	5.5	2.1	-	-
Sr	307	207	262	167	109	333	266	165	115	350	320	225	316
Th	14	9.5	7.4	11	11	7.5	5.8	18	16	10.7	10.5	8.3	10.3
U	2.6	1.8	1.7	2.8	2.6	2.0	1.9	3.7	3.5	2.8	2.7	2.32	2.45
V	92	89	66	97	79	58	68	30	65	107	97	110	53
W	0.78	1.00	1.30	1.25	1.9	0.81	0.60	1.14	1.8	2	1.9	-	-
Y	18	18	13	22	23	13	15	27	28	22	21	26	21
Zn	66	68	54	64	71	45	51	61	69	71	67	74.1	52
Zr	162	164	128	186	190	119	121	193	196	190	193	135	237

注:氧化物含量为%,Ag、Au、Hg 含量为 10⁻⁹,其他元素含量为 10⁻⁶;中国东部各单元的样品数是指分析组合样的数量

壳的元素地球化学特征,本文计算了部分元素比值,并分别与加拿大地盾、日本岛弧和2种全球大陆上地壳模型的相应比值进行对比(表2)。

2.2.1 指示岛弧岩浆作用的元素比值

对于可以指示岛弧岩浆作用的La/As、La/B、La/Nb、Nb/Th、Nb/U和Ba/Th比值,岛弧与地盾上地壳存在明显差异。岛弧La/As、La/B、Nb/Th、Nb/U、Ba/Th比值低,而La/Nb比值高,地盾则相反(表2)。具体而言,La/As比值日本岛弧3.19,Rudnick模型6.46,McLennan模型20;La/B比值Rudnick模型

1.82,加拿大地盾3.51;Nb/Th比值日本岛弧1.08,Rudnick模型1.14,McLennan模型1.12,加拿大地盾2.52;Nb/U比值日本岛弧3.9,加拿大地盾10.6;Ba/Th比值日本岛弧55,加拿大地盾104;La/Nb比值日本岛弧2.41,加拿大地盾1.24。

中国大陆古亚洲褶皱系出露地壳La/As比值介于3.19~12.9之间,绝大多数小于9;La/B比值0.99~3.41,绝大多数小于2.4;Nb/Th比值1.00~1.46,多小于1.10;Nb/U比值3.9~6.4;Ba/Th比值为34~73;La/Nb比值2.53~2.87。因此,古亚洲褶皱系出露地壳La/As、La/B、La/Nb、Nb/Th、Nb/U和Ba/Th比值

表2 中国大陆出露地壳部分元素的比值
Table 2 Selected element ratios in the exposed crust of the continent of China

	La/Nb	La/As	La/B	Ba/Th	Th/U	K/U (10 ⁴)	U/Pb	K/Pb (10 ⁴)	Nb/U	Nb/Th	Cu/Au (10 ⁴)	μ	A
阿尔泰褶皱带	2.53	12.9	2.27	34	5.98	1.25	0.15	0.22	6.4	1.06	3.12	9.7	1.45
西准噶尔	2.75	3.19	0.99	68	4.12	1.11	0.14	0.10	4.5	1.10	5.22	9.1	1.04
东准噶尔	2.87	4.91	1.82	73	3.84	1.25	0.15	0.18	5.2	1.37	4.17	10	1.05
天山褶皱带	2.57	6.41	2.00	53	3.61	0.92	0.16	0.17	3.9	1.07	4.71	10	1.32
内蒙古-兴安褶皱带	2.57	5.81	2.40	54	4.36	1.34	0.12	0.21	6.4	1.46	2.33	8.0	1.56
吉黑褶皱带	2.64	8.53	3.41	48	4.78	1.21	0.14	0.15	4.8	1.00	0.99	8.8	1.67
内蒙地轴	2.50	18.2	3.64	80	5.12	1.59	0.10	0.13	9.4	1.84	2.82	6.5	1.34
燕山褶皱带	2.67	10.7	1.45	110	5.08	2.12	0.08	0.15	10	1.96	2.65	5.4	1.00
辽东台隆	2.16	21.6	1.71	55	5.55	1.39	0.12	0.19	9.5	1.71	2.96	7.6	1.60
山西台隆	3.15	14.3	1.05	61	5.33	1.37	0.10	0.12	6.7	1.25	1.92	6.8	1.17
鲁西台隆	2.26	7.78	0.72	85	4.92	1.74	0.09	0.14	6.6	1.34	3.02	5.6	0.94
胶东台隆	3.27	17.8	2.67	138	5.62	2.11	0.07	0.20	7.5	1.34	2.00	4.6	1.14
豫西台隆	2.85	18.5	1.32	112	5.50	1.75	0.05	0.13	9.3	1.69	3.52	3.5	1.16
大别山	3.85	76.9	13.5	98	6.40	1.65	0.07	0.15	8.7	1.35	4.03	4.9	1.33
北秦岭	2.71	11.5	2.92	59	5.38	1.01	0.08	0.10	5.4	1.00	3.08	5.3	1.95
南秦岭	2.07	6.17	0.74	74	5.28	1.25	0.11	0.07	7.8	1.47	2.66	6.9	1.38
西秦岭	2.40	3.12	0.69	44	4.35	0.88	0.11	0.07	5.9	1.35		7.4	1.13
下扬子地块	2.53	7.17	1.03	55	3.93	0.88	0.15	0.16	5.4	1.36	1.83	9.6	1.78
江南地块	2.69	6.73	0.63	40	4.23	0.92	0.14	0.13	5.0	1.18	2.16	9.4	1.71
宜昌-神农架台褶带	2.69	4.46	0.64	50	3.75	1.09	0.18	0.12	4.6	1.24	1.55	12	1.28
龙门-大巴台褶带	2.60	7.22	0.79	88	3.05	1.05	0.09	0.18	5.3	1.72	2.64	5.9	1.12
东南沿海火山岩带	2.83	17.0	7.85	42	4.86	1.03	0.15	0.22	4.9	1.00	0.89	9.6	2.65
闽西-赣南褶皱带	2.72	12.0	2.04	36	4.57	0.90	0.13	0.13	5.1	1.12	1.32	8.4	2.39
McLennan (2001)	2.50	20.0	2.00	51	3.82	1.00	0.16	0.16	4.3	1.12	1.39	10.7	1.78
Rudnick et al (2004)	2.58	6.46	1.82	60	3.89	0.86	0.16	0.14	4.4	1.14	1.87	10.4	1.70
Togashi et al (2000)	2.41	3.19		55	3.58	0.87	0.14	0.12	3.9	1.08		8.9	1.41
Shaw et al (1986)	1.24		3.51	104	4.20	1.05	0.14	0.15	10.6	2.52	0.77	9.4	1.64

注: μ 值 (²³⁸U/²³⁴Pb) 的计算中取上地壳 ²⁰⁶Pb/²³⁴Pb=19.3, ²⁰⁷Pb/²³⁴Pb=15.8, ²⁰⁸Pb/²³⁴Pb=39.3^[24]; A 值为生热率/μW·m⁻³, 计算中密度取 2.8×10³kg/m³

特征更接近岛弧上地壳。
华北地台内部各构造单元出露地壳La/As比值介于7.78~

21.6之间,绝大多数大于10;Nb/Th比值1.25~1.96;Nb/U比值6.6~10;Ba/Th比值为55~138,多数大于80;La/B比值0.72~

3.64,绝大多数小于3;La/Nb比值2.16~3.27。华北地台出露地壳La/As、Nb/Th、Nb/U和Ba/Th比值特征相对更接近地盾区上地壳,而La/B和La/Nb比值相对更接近岛弧上地壳。

秦岭造山带出露地壳La/As比值为3.12~11.5;Nb/Th比值1.00~1.47;Nb/U比值5.4~7.8;Ba/Th比值为44~74;La/Nb比值2.07~2.71。因此,秦岭出露地壳La/Nb、La/As、Nb/Th、Nb/U和Ba/Th比值特征相对更接近岛弧区。

大别山造山带出露地壳La/As比值76.9,Nb/Th比值1.35,Nb/U比值8.7,Ba/Th比值为98,La/Nb比值3.85。除La/Nb比值外,大别山出露地壳更接近地盾区上地壳的元素比值特征。

扬子地台出露地壳La/As比值介于4.46~7.22之间;Nb/Th比值1.18~1.36,仅龙门-大巴台褶皱带为1.72;Nb/U比值4.6~5.4;Ba/Th比值40~55,龙门-大巴台褶皱带为88;La/Nb比值2.53~2.69。扬子地台出露地壳La/As、Nb/Th、Nb/U和Ba/Th比值特征相对更接近岛弧上地壳,而与华北地台差异较为明显。

华南褶皱系出露地壳La/Nb(2.72~2.83)、Nb/Th(1.00~1.12)、Nb/U(4.9~5.1)和Ba/Th(36~42)比值接近岛弧上地壳,但La/As(12~17)和La/B(2.04~7.85)比值接近地盾上地壳。

总之,从La/As、La/B、La/Nb、Nb/Th、Nb/U和Ba/Th比值来看,除华北地台和大别山出露地壳与地盾更为接近外,中国古亚洲褶皱系、秦岭造山带、华南褶皱系和扬子地台出露地壳与岛弧更为接近。

2.2.2 与放射性生热元素相关的元素比值

对于放射性生热元素U、Th、K,岛弧上地壳Th/U、K/U比值分别为3.58~3.89和0.86~0.87,较地盾的相应比值(分别为3.82~4.20和1.00~1.05)低;而两者U/Pb比值均大于0.13, μ 值($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$)均大于8(表2)。

中国大陆古亚洲褶皱系出露地壳Th/U比值在3.61~5.98之间,多数大于4;K/U比值0.92~1.34,多数大于1.1;U/Pb比值大于0.12, μ 值大于8。同时,Th/U比值与生热率之间具有正相关趋势,但放射性生热率较岛弧、地盾或全球平均值偏低(表2)。

华北地台出露地壳Th/U比值在4.92~5.62之间;K/U比值1.37~2.12,多数大于1.5;U/Pb比值小于0.13, μ 值低,小于8;Th/U比值与生热率之间显示正相关趋势,放射性生热率明显偏低。

秦岭造山带出露地壳Th/U比值4.35~5.38;K/U比值0.88~1.01;U/Pb比值小于0.12, μ 值小于8;Th/U比值与生热率之间亦具正相关关系。而大别山造山带出露地壳Th/U、K/U比值高,分别为6.40、1.65;U/Pb比值仅0.07, μ 值仅4.9。

扬子地台出露地壳Th/U比值3.05~4.23,多数小于4;K/U比值0.88~1.09;U/Pb比值多数大于0.14, μ 值多数大于8,仅龙门-大巴台褶皱带U/Pb比值为0.09, μ 值5.9。

华南褶皱系出露地壳Th/U比值在4.57~4.86之间;K/U比值0.90~1.03;U/Pb比值大于0.13, μ 值大于8。扬子地台和

南褶皱系作为整体,也显示Th/U比值与生热率之间的正相关趋势。

整体而言,中国大陆出露地壳表现出由北而南K/U比值降低的趋势,其变化界线大致在华北地台与秦岭造山带之间。与此对应,中国大陆出露地壳的生热率表现出由北向南逐渐增高的趋势。华北地台、秦岭-大别山造山带出露地壳具有独特的低U/Pb和 μ 值特征,与岛弧、地盾或全球平均上地壳迥然不同。与本文研究的其他地区相比,扬子地台具有较低的Th/U比值。

3 讨论

3.1 中国大陆地壳演化的探讨

前人研究结果表明,岩浆作用是决定地壳成分及其演化的最主要因素,板块机制下大陆地壳的生长主要通过弧岩浆作用(arc magmatism)实现^[1,13]。弧岩浆岩的重要特征是,Nb、Ta相对Th、U、La等明显亏损,同时强烈富集As、B、Sb^[10,13,14],因此弧岩浆岩的Nb/Th、Nb/U值小,La/As、La/Nb值大。中国大陆东部和新疆北部出露地壳Nb/Th、Nb/U、La/As、La/Nb比值特征介于日本岛弧与加拿大地盾上地壳之间;同时Co、Cr、Ni、V丰度相对于全球大陆上地壳平均值整体略低,但高于加拿大地盾(表1,图1、图2)。所以,中国大陆东部和新疆北部出露地壳成分成熟程度介于不成熟的岛弧与成熟的地盾之间,总体而言与Rudnick等^[9]的全球大陆上地壳成分模型比较接近。

中国大陆东部和新疆北部出露地壳成分表现出显著的横向非均匀性特征。华北地台和大别山出露地壳在Nb/Th、Nb/U、La/As比值上与其他地区差异明显。华北地台和秦岭-大别山构成了中国大陆的低U/Pb和 μ 值区。扬子地台出露地壳Nb/Th、Nb/U、La/As、La/Nb比值特征更接近岛弧上地壳,Th/U比值在所研究的区域中最低。多数造山带(褶皱带)之间在Nb/Th、Nb/U、La/Nb、Th/U比值和 μ 值特征上较为相近,其差异更多地表现为K/U比值的不同。

对于经历多次强烈构造-热事件影响的中国大陆而言,下地壳成分会因后期岩浆底侵、拆沉等机制而发生显著的变化,相比之下出露地壳可以更好地保留块体自形成以来的成分信息。中国大陆东部和新疆北部造山带(褶皱带)出露地壳成分的相似性表明其元素地球化学特征主要继承自弧岩浆岩,暗示板块俯冲机制下弧岩浆过程是导致这些地区陆壳形成的主要机制,即使有后期的改造,也未能明显湮没弧岩浆作用的印记。华北地台出露地壳较高的Nb/Th、Nb/U比值和较低的La/As比值暗示,板内岩浆作用对其形成也有较显著的影响^[9],即其仍然保留有形成演化历程中所经历的板内岩浆作用的印记。

从上述分析可以得出以下认识:①如果华北地台和扬子地台可以类比为地质历史中陆壳海台(continental submarine plateau,见下文),那么原始华北地台可能是大洋板块中的地幔柱活动所形成的洋底高原,其表壳仍保留较明显的板内岩

浆岩元素地球化学特征;原始扬子地台则可能是弧岩浆过程所形成的某一大陆的边缘部分,后来在超级大陆裂解过程中成为陆壳海台,故而其表壳元素地球化学特征与华北地台迥然不同。②对于本文所涉及的区域,板块俯冲机制下弧岩浆过程是大陆地壳横向生长的主要方式,例如华北地台以北的古亚洲褶皱系、扬子地台东侧的华南褶皱系。秦岭—大别山造山带的低U/Pb和 μ 值特征是由于造山带在碰撞阶段卷入华北地台南缘地壳的结果。③华北地台出露地壳成分不能作为中国大陆出露地壳成分的可靠代表,其低U/Pb和 μ 值特征不具备广泛代表性;同样地,以华北地台及其周边出露地壳样品分析为基础的中国中东部上地壳成分^[5,9]也难以在一般意义上代表中国大陆和全球大陆上地壳的平均成分。

3.2 对全球陆壳成分研究的思考

中国大陆东部和新疆北部出露地壳与最新发表的全球大陆上地壳不同成分模型相比,其Au、Hg、Mo、Sn和W丰度均明显偏低。由于中国大陆的分析数据建立在可靠的分析技术和严格的数据质量监控之上^[4,7,11],所以有充分理由相信,对丰度值小于 1×10^{-6} 的Au、Hg、Mo、W等“困难”元素而言,目前国际上发表的出露地壳、上地壳乃至全地壳丰度值是不准确的。注意到本文研究区包含了富集Sn、W的中国大陆东南部地区^[15-17],而且Mo也是中国的优势矿种,因此全球大陆出露地壳和上地壳Mo、Sn和W的丰度值应比中国大陆更低。由于矿产资源研究者倾向于将陆地矿产储量(地下1000 m深度以上的)与地壳丰度值直接相联系^[14,18],这些“困难”元素丰度值的正确估计在资源预测方面就具有重要意义。

目前国内外建立的区域上地壳化学成分模型,多不计入碳酸盐岩地层^[1,3,5,6,8,9]。然而,对于如华北、扬子地台这样发育大量碳酸盐岩地层的地区而言,这样处理的结果将严重低估Ca、Mg在出露地壳中的丰度值(图1、图2),而高估Si、Al、Fe等其他主量元素的丰度值(见参考文献[5]表2的相关数据),同时还会影响到对地壳中CO₂丰度的正确估计,进而涉及地球系统C的循环、平衡等问题。构造地质学研究表明,在燕山地区大套元古宙碳酸盐岩地层已卷入中生代的逆掩推覆系统,并曾被埋入上地壳下部到地壳的深度^[19]。对大别山的研究亦显示,碳酸盐岩地层曾随其他表壳岩一起经历深俯冲过程^[20]。因此,在碳酸盐岩地层发育的褶皱带,碳酸盐岩至少在上地壳中占据相当比例。海洋地质研究表明,大洋中分布有不少大面积的陆壳海台,其盖层中广泛分布碳酸盐岩层(如福克兰海台、塞舌尔海台)^[21];华北地台和扬子地台也被认为是地质历史中的海台^[22]。考虑到它们属于全球陆壳的一部分,且在海洋板块闭合时海台本身会添加到大陆板块中^[22],那么就有理由怀疑当前已发表的全球大陆上地壳成分模型对SiO₂含量的估计偏高,而对CaO和MgO含量的估计偏低。

高山等^[5,6]基于对华北地台和秦岭造山带地壳成分的研究,提出全球大陆地壳的平均 μ 值(≈ 5)应比现有根据对克拉通地区研究获得的 μ 值(≈ 7)低。包括中国东部在内的数据显示,下地壳的 μ 值在2.9~4.5之间^[1-3,5,6]。若整体地壳 μ

值在7左右^[1-3],则必然要求上地壳 μ 值大于7。实际上,Taylor等^[1]、Wedepohl^[2]、Rudnick等^[23]给出的上地壳 μ 值为8.7~9.5,而高山等^[5,6]给出的华北地台和秦岭造山带上地壳 μ 值仅为5.7。高山等^[5,6]提出2点旁证来支持其结论,一是Zindler等^[23]从化学地球动力学角度估算出的整体地壳 μ 值低(5.7);二是Asmerom等^[24]对世界上年轻岛弧和其中的河流沉积物的Pb同位素研究亦表明岛弧区的 μ 值较低。对于后一点,Asmerom等^[24]认为,在风化过程中U的丢失可能是导致 μ 值降低的原因。对于华北地台和秦岭造山带而言,有证据表明其低 μ 值特征源于深部而非风化过程所致^[5,6,25]。这就提出一个重要的问题,大陆上地壳 μ 值究竟是高还是低?本文对中国大陆东部和新疆北部出露地壳的 μ 值估算显示,低 μ 值仅仅是华北地台和秦岭—大别山造山带的特征,对于扬子地台主体、华南褶皱系、古亚洲褶皱系等地区,其出露地壳 μ 值均大于8。对这一结果可做如下分析:①对于全球陆壳而言,中国大陆东部和新疆北部仍然不具备代表性,则全球大陆上地壳和整体地壳的 μ 值仍有可能比现有的大多数估计值低。②全球陆壳的确具有高 μ 值,则Zindler等^[23]的U-Pb同位素化学地球动力学模式可能有问题。③如果Zindler等^[23]的动力学模式没有问题,则全球陆壳低 μ 值和上地壳高 μ 值的特征,必然要求下地壳的 μ 值比现有的估计值还要低,这意味着如果对全球大陆下地壳Pb丰度的估计是准确的,则下地壳的U含量应该比现有估计值更低。显然,这些问题都值得进一步研究。

本文所展示的中国大陆东部和新疆北部不同大地构造单元出露地壳成分的横向不均匀性,提示人们在全球地壳成分的研究中仍然要重视其区域非均匀性问题。20世纪的研究多集中于欧洲和北美前寒武纪结晶基底,尤其偏重加拿大地盾。高山等^[6]的工作为国际地球化学界提供了华北地台和秦岭造山带的数据库,但如上文所揭示的华北地台和秦岭造山带成分的特殊性,该地区难以作为一般意义上全球地壳平均成分的可靠代表。虽然Rudnick等^[23]的陆壳成分模型在克拉通和地台之外,还考虑了秦岭造山带和日本岛弧的数据。但这两地在全球显生宙造山带中体积比例并不大,同时还存在造山带地壳之间的成分差异等问题。Rudnick等^[23]的模型仍存在进一步改进的必要。

应该引起注意的是,已开展系统采样和分析的地区基本集中于北半球^[1-10,12,13],所以,即使上地壳成分模型的构建中包括中国大陆更广阔地域的数据,可能也仅代表北半球大陆上地壳的平均成分。已有证据显示:澳大利亚元古宙出露区上地壳生热率可高达 $3 \sim 6 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[26],印度北部上地壳也可能具有高生热率特征($1.5 \sim 6 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)^[27]。中国大陆亲冈瓦纳的扬子地台、华南褶皱系出露地壳的生热率整体上亦高于北部地区(表2)。因此,有理由推测南方冈瓦纳大陆上地壳具有较北方劳亚大陆更高的放射性生热元素丰度,这可能代表了半球尺度的陆壳成分非均匀性。未来陆壳成分研究应该更注重对(特提斯域以南的)南方大陆的采样和分析。对地壳系统采样分析是一项费钱费时的的工作,对于非洲、南美洲和

印度等发展中地区尤其如此。采用应用地球化学家提出的超低密度地球化学调查方法^[28,29],快速取得南方大陆出露地壳成分的平均值,这对学术界了解全球大陆成分的横向非均匀性具有重要意义,应当是应用地球化学对理论地球化学研究的重要贡献。

参考文献:

- [1] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Rev. Geophys.*, 1995, 33: 241–265.
- [2] Rudnick R L, Fountain D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crust perspective[J]. *Rev. Geophys.*, 1995, 33: 267–309.
- [3] Wedepohl K H. The composition of the continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 1217–1232.
- [4] 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.
- [5] Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(11): 1959–1975.
- [6] 高山,骆庭川,张本仁,等.中国东部地壳的结构和组成[J].中国科学(D辑),1999,29(3):204–213.
- [7] 杜佩轩.新疆北部岩石元素丰度值及评价参数[M].西安:西安地图出版社,1997.1–125.
- [8] McLennan S M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust[J]. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2001, 2:1–24.
- [9] Rudnick R L, Gao S. The composition of continental crust[A]. In: Rudnick R L ed. *Treatise on geochemistry*, vol. 3, the crust[C]. Amsterdam: Elsevier, 2004. 1–64.
- [10] Togashi S, Imai N, Okuyama-Kosunose Y, et al. Young upper crustal chemical composition of the orogenic Japan Arc[J]. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2000, 1:1–24.
- [11] 谢学锦.中国东部与全球大陆地壳化学成分的比较[J].地质通报, 2004,23(11):1057–1058.
- [12] Shaw D M, Cramer J J, Higgins M D, et al. Composition of the Canadian Precambrian shield and the continental crust of the Earth[A]. In: Dawson J B et al, eds. *The nature of the lower continental crust*[C]. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1986. 24, 275–282.
- [13] Rudnick R L. Making continental crust[J]. *Nature*, 1995, 378: 571–578.
- [14] 中国科学院地球化学研究所.高等地球化学[M].北京:科学出版社,2000.1–491.
- [15] 谢学锦,刘大文.地球化学块体——概念与方法学的发展[J].中国地质,2002,29(3):226–242.
- [16] 刘大文.地球化学块体的概念及其研究意义[J].地球化学,2002,31(6):539–548.
- [17] 刘大文,谢学锦.基于地球化学块体概念的中国锡资源潜力评价[J].中国地质,2005,32(1):25–32.
- [18] Erickson R L. Crustal abundance of elements and mineral reserves and resources[C]. U.S. Geol. Surv. Professional Paper 820, 1973. 21–25.
- [19] Davis G A, Qian X, Zheng Y, et al. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmengshan: A Chinese metamorphic core complex north of Beijing[A]. In: Yin A, Harrison T M, eds. *The tectonic evolution of Asia*[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 253–280.
- [20] 王清晨, Rumble D. 中国大别山双河超高压变质大理岩的氧、碳同位素[J].中国科学(D辑),1999,29(3):214–221.
- [21] 和政军,任纪舜.大洋中的水下陆块[J].海洋地质与第四纪地质, 1994,14(2):71–80.
- [22] 任纪舜,王作勋,陈炳蔚,等.从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明[M].北京:地质出版社,1999.1–50.
- [23] Zindler A, Hart S. Chemical geodynamics[J]. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1986, 14: 493–571.
- [24] Asmerom Y, Jacobsen S B. The lead isotopic evolution of the Earth: Inferences from river water suspended loads [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, 115: 245–256.
- [25] Zhang H F, Gao S, Zhang B R, et al. Lead isotopes of granitoids suggest Devonian accretion of the Yangtze (South China) to North China cratons[J]. *Geology*, 1997, 25: 1015–1018.
- [26] Neumann N, Sandiford M, Foden J. Regional geochemistry and continental heat flow: implications for the origin of the South Australian heat flow anomaly[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 183(1–2): 107–120.
- [27] Cuney M, Le Fort P, Zhixiang W. Uranium and thorium geochemistry and mineralogy in the Manaslu Leucogranite (Nepal, Himalaya)[A]. In: Xu K, Tu G, eds. *Geology of granites and their metallogenic relations—Proceedings of an international symposium*[C]. Beijing: Science Press, 1984. 853–873.
- [28] 谢学锦.全球地球化学填图[J].中国地质,2003,30(1):1–9.
- [29] 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.