

中国稀土元素地球化学背景与远景区优选

王学求, 周 建, 迟清华, 王 玮, 张必敏, 聂兰仕,
刘东盛, 徐善法, 吴 慧, 高燕芳

自然资源部地球化学探测重点实验室, 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;
联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研究中心, 河北廊坊 065000

摘 要: 稀土元素是现代科技、新能源、特种制造的关键性材料, 以其不可替代性和稀缺性, 而备受关注, 很多国家将其列为关键资源或战略资源。地球化学是研究稀土分布和发现稀土矿床的有效方法。本文利用“化学地球”大科学计划获得的全国 15 个稀土元素地球化学基准数据以及“一带一路”的中蒙边境、中缅老越边境地区地球化学填图数据为基础, 阐述中国稀土地球化学背景和圈定远景区。获得全国岩石和汇水域沉积物 15 个稀土元素、轻稀土(Σ LREE)、重稀土(Σ HREE)和总稀土(Σ REE)背景值。全国岩石背景值分别为: Σ LREE 121 $\mu\text{g/g}$, Σ HREE 35.0 $\mu\text{g/g}$, Σ REE 157 $\mu\text{g/g}$, 轻重稀土比值为 3.5。全国汇水域沉积物背景值分别为: Σ LREE 134.0 $\mu\text{g/g}$, Σ HREE 38.5 $\mu\text{g/g}$, 和 Σ REE 173 $\mu\text{g/g}$, 轻重稀土比值为 3.5。总体上汇水域沉积物与岩石一致, 但含量略高于岩石。全国共圈定稀土地球化学异常区 35 处, 其中有 26 处异常与已知稀土矿或稀土成矿带相吻合, 新发现稀土超富集中心的稀土异常 9 处, 分别位于内蒙白云鄂博以西的乌拉特中旗—乌拉特后旗、华南异常富集中心、松潘—甘孜—攀西地区、云南红河州—中越边境、三江南段—中缅边境、雅鲁藏布江东段、西藏札达地区、中塔边境、黔东南安—荔波地区。这些异常显示, 是具有寻找白云鄂博型、碱性岩型、离子吸附型、花岗伟晶岩型、磷块岩型和泥岩型稀土矿的有利地区。

关键词: 稀土元素; 地球化学背景; 异常; 空间分布; 远景区

中图分类号: P632 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.102802

Geochemical Background and Distribution of Rare Earth Elements in China: Implications for Potential Prospects

WANG Xue-qiu, ZHOU Jian, CHI Qing-hua, WANG Wei, ZHANG Bi-min,
NIE Lan-shi, LIU Dong-sheng, XU Shan-fa, WU Hui, GAO Yan-fang

Key Laboratory of Geochemical Exploration, Ministry of Natural Resources, Institute of Geophysical and
Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei 065000;
UNESCO International Centre on Global-scale Geochemistry, Langfang, Hebei 065000

Abstract: Rare earth elements (REEs) are widely used in high-tech industries and are categorized into the list of critical metals by many countries. Geochemistry is an effective method for studying the concentration and distribution of REEs and discovering rare earth deposits. However geochemical data of REEs are not available in the world because most of geochemical mapping projects have not analyzed the REEs. This has greatly restricted the understanding of the spatial distribution and exploration for REEs in the world. In this paper, the concentration and spatial distribution of REEs were systematically described for the first time by using the data obtained from the Mapping Chemical Earth Program-China Geochemical Baselines (CGB) project and the Belt and Road Geochemical Mapping Project. Geochemical background values of Σ LREE, Σ HREE and Σ REE in rocks are 121 $\mu\text{g/g}$, 35.0 $\mu\text{g/g}$, 157 $\mu\text{g/g}$ respectively, and the ratio of Σ LREE to Σ HREE in rocks is 0.35. Geochemical

本文由国家重点研发计划项目“穿透性地球化学勘查技术”(编号: 2016YFC0600600)、国家专项“深部探测技术与实验研究”(编号: SinoProbe-04)和中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20190451)联合资助。

收稿日期: 2020-08-13; 改回日期: 2020-10-02; 网络首发日期: 2020-10-29。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 王学求, 男, 1963 年生。博士, 研究员。长期从事勘查地球化学研究。通讯地址: 065000, 河北省廊坊市金光道 84 号。

E-mail: wangxueqiu@igge.cn。

background values of Σ LREE, Σ HREE and Σ REE in catchment sediments are 134.0 $\mu\text{g/g}$, 38.5 $\mu\text{g/g}$ and 173 $\mu\text{g/g}$ respectively, and the ratio of Σ LREE to Σ HREE in rocks is 0.35. The background concentrations of REE in sediments are consistent with those in rocks. A total of 35 anomalies were delineated. Among these anomalies, 26 geochemical anomalies are consistent with the known REE deposits, whereas newly discovered 9 anomalies are spatially distributed in Urad Middle Banner–Urad Rear Banner of Inner Mongolia, enrichment areas of Southern China, Songpan–Garze–Panxi rift, China–Vietnam boundary area, China–Myanmar boundary area, western part of Kunlun Mountains, Tarlung Zangbo River, Zhada County of Tibet, and east part of Guizhou Province. The anomalies show potential targets for the follow-up exploration of the REE deposits of Bayan Obo type, carbonite-alkali-related type, ion-adsorbed type, granite pegmatite type, sedimentary clay type, and sedimentary phosphate type.

Key words: rare earth elements (REEs); geochemical background; anomaly; spatial distribution; potential targets

稀土元素因在现代高科技和新材料领域的不可替代性,而被称为关键矿产资源。中国、美国、欧盟、日本、韩国等都将稀土列入关键矿产资源。国际理论化学和应用化学联合会(IUPAC)将稀土元素定义为元素周期表中原子序数为 57 到 71 的 15 个镧系元素——镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)、钷(Pm)、钐(Sm)、铕(Eu)、钆(Gd)、铽(Tb)、镝(Dy)、钬(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、镱(Yb)、镱(Lu),以及与镧系密切相关的元素——钇(Y)和钪(Sc)共 17 种元素。因钷(Pm)在自然界含量极微,是放射性裂变产物,考虑钪(Sc)不属于镧系元素,通常列入分散元素之中,将在分散元素一文另行讨论。因此,本文讨论的稀土元素是指除钷(Pm)和钪(Sc)以外的 15 个稀土元素。稀土矿床可以分为原生稀土矿和次生稀土矿。原生稀土矿可以分为碳酸岩型、碱性花岗岩型、磷块岩型和 IOCG 型等。次生稀土矿可以分为离子吸附型(又称风化壳型)、独居石、磷钇矿砂矿、海滨砂矿和深海泥型等。目前全球三大轻稀土矿(我国白云鄂博、牦牛坪、美国 Mountain Pass)都为碳酸岩型。重稀土矿主要为离子吸附型稀土矿,主要分布在华南地区。我国稀土资源极其丰富,白云鄂博和牦牛坪为世界第一和第三大稀土矿,华南地区离子吸附型稀土矿产是最具战略意义的矿种之一。20 世纪 50 年代初期发现并探明超大型白云鄂博铁钪稀土矿床(白鸽, 2012), 60 年代中期发现江西、广东等地的风化淋积型(离子吸附型)稀土矿床, 70 年代初期发现山东微山磷块岩型稀土矿床, 80 年代中期发现四川凉山“牦牛坪式”大型稀土矿床等。中国稀土资源的时代分布,主要集中在中晚元古代以后的地质历史时期,太古代时期很少有稀土元素富集成矿。

袁忠信等(2012)在《中国稀土矿床成矿规律》书中,按稀土金属成矿作用与大地构造相结合划分了 14 个一级成矿远景区, 11 个二级成矿远景区和 10 个三级远景区。陈毓川等(2016)在《中国重要矿产和区域成矿规律》书中,根据对区域成矿规律的

研究,将全国划分了 31 个稀土成矿带。李童斐等(2018)根据中国稀土矿时空分布、岩浆岩、构造等划分了 17 个稀土矿成矿区带。这些划分主要基于已发现的稀土矿分布及有利的成矿地质背景。

地球化学是研究稀土分布和发现稀土矿床的有效方法。但遗憾的是我国“区域化探全国扫面计划”只分析了两个稀土元素 La 和 Y, 并且 80 年代受实验室分析技术限制,这两个元素数据精度和质量都不高,利用现有数据了解稀土元素分布规律和找矿预测受到了极大限制。自 1994 年提出全球地球化学基准计划以来(IGCP360)(Darnley, 1995), 开始在各国家陆续实施(Darnley, 1990; Xie, 1990; Reimann, 2005; 王学求等, 2006, 2010; 王学求, 2012; David et al., 2012), 遗憾国际上已实施的地球化学基准计划也并没有分析全部稀土元素(Liu et al., 2015; Caritat et al., 2018)。“中国地球化学基准”计划(简称 CGB 计划)分析了全部 16 个稀土元素(Wang, 2015; 王学求等, 2016)。这是目前世界上唯一分析了 16 个稀土元素的地球化学填图计划,为中国研究全部稀土元素地球化学背景和超常富集区提供了极为有利条件,同时后续的“化学地球”大科学计划开展的“一带一路”跨境地球化学填图,为研究稀土成矿带跨境分布提供了第一手数据。本文将基于“中国地球化学基准值计划”采集的 11 699 件岩石样品和 3392 个点位汇水域沉积物深层样品,阐述稀土元素地球化学背景和异常的空间分布,并利用“一带一路”跨境地球化学填图项目 10 000 余件样品数据,圈定部分边境地区地球化学异常,对稀土元素远景区进行优选。

1 方法技术

1.1 样品采集

全国地球化学基准计划是以 1:20 万图幅为基准网格单元,建立覆盖全国的地球化学基准网,在每个网格单元中采集代表性岩石样品和汇水域沉积物样品。

全国系统采集代表性的沉积岩、岩浆岩和变质岩样品共计 11 699 件, 其中岩浆岩 4031 件, 沉积岩 5963 件, 变质岩 1705 件。岩石样品采集是以 1:20 万地质图为基础采样单元格, 每个采样单元内侵入岩以期次和岩性为单元, 地层以系为单元采集代表性的主要岩石, 并按地层厚度将同类岩性样品进行加权组合。在采样过程中, 确保样品新鲜、无蚀变。

汇水域沉积物样品采集是每个 1:20 万图幅基准网格单元, 选择 2 个汇水域部署采样点位, 一般汇水域面积为 2000~5000 km², 全国共计部署 3392 个点位, 每个点位同时采集表层样品(0~25 cm)和深层样品(100~150 cm), 共采集表层样品 3392 件, 深层土壤 3390 件(Wang, 2015; 王学求等, 2016)。深层样品受人类活动影响较少, 继承了岩石风化产物, 代表了元素在自然界的均匀分布, 因此对矿产资源评价, 我们使用深层样品数据。

1.2 样品分析

岩石样品送至实验室磨至 200 目。汇水域沉积物样品, 筛分 10 目(2 mm)以下样品, 研磨至 200 目。分析方法简要流程为: 用氢氟酸、硝酸、硫酸分解样品, 并赶尽硫酸, 用王水溶解后, 移至塑料试管中定容。分取澄清溶液, 用 3%硝酸溶液稀释至 1000 倍后, 用等离子体质谱仪测定样品中 15 个稀土元素含量。以 50 个号码为一分析批次, 每个批次插入 4 个国家一级标准物质来控制分析准确度和精密度, 国家一级标准物质合格率要求 100%; 随机抽取 10%比例的样品作为重复性检验样品, 重复性检验样品合格率要求 90%; 每一个送样批次分析完毕后, 对部分特高或特低含量试样, 进行异常点重复性检验, 异常点检验合格率要求 85%(张勤等, 2012)。检出限、报出率和重复样分析的准确性见表 1, 所有稀土元素分析数据质量可靠。

1.3 数据处理与作图

背景值是用全部数据中位数值或剔除大于和小于 3 倍离差以后数据的平均值。除了对单一稀土进行背景值计算以外, 还对稀土总量、轻稀土、重

稀土进行了累加计算。稀土总量(TREE)以 15 个稀土元素(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y)含量累加值表述, 轻稀土(LREE)总量以(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu)含量累加值表述, 重稀土(HREE)总量以(Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y)含量累加值表述。

汇水域沉积物形成的土壤是岩石风化的产物, 继承了原岩的成分, 并经过河流从上游向下游的搬运过程而发生混匀, 对呈现元素空间分布具有天然代表性, 避免了岩石样品采样的局限性, 是研究元素空间分布, 圈定地球化学异常的理想介质(Xie et al., 1997; Wang, 2015)。元素的空间分布以地球化学基准图来进行表述, 以累积频率为基础划分 18 个量级基线制作地球化学基准图, 并使用四分位数, 即累积频率 25%、50%、75%和 85%分别作为低背景、背景、高背景和异常基线(王学求等, 2016, 2020)。本文采用累计频率 75%作为异常下限, 85%作为异常浓集中心, 圈定两级地球化学异常, 开展远景区预测。

2 全国稀土元素背景值特征

表 2 为全国岩石和汇水域沉积物稀土元素基准值含量特征。可以看出中位数与剔除大于 3 倍离差以后计算的背景值高度一致。全国岩石 15 个稀土元素、轻稀土、重稀土和总稀土背景值与中位数非常一致, 与 Wedepohl(1995)给出的地壳丰度基本一致。全国汇水域沉积物稀土总量背景值在表层样品(178 μg/g)和深层样品(173 μg/g)的非常接近, 但都略高于全国岩石背景值(157 μg/g)、中国大陆出露岩石丰度(159 μg/g)(迟清华和鄢明才, 2007)和地壳稀土丰度 168 μg/g(Wedepohl, 1995), 表明稀土元素从原生到表生风化过程发生了富集作用, 富集系数为 1.1 左右。汇水域沉积物轻稀土和重稀土背景值分别为 134 μg/g 和 38 μg/g, 略高于全国岩石背景值 121 μg/g 和 35 μg/g。轻稀土和重稀土比值与全国岩石轻稀土和重稀土比值一致, 均为 3.5。轻稀土、重稀土和总稀土概率分布一致, 基本呈正态分布(图 1),

表 1 稀土元素分析质量评价
Table 1 Analysis quality evaluation of REEs

测试指标	La /(μg/g)	Ce /(μg/g)	Pr /(μg/g)	Nd /(μg/g)	Sm /(μg/g)	Eu /(μg/g)	Gd /(μg/g)	Tb /(μg/g)
检出限	1	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
报出率	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	99.98%	100.00%	99.98%
重复样合格率	99.1%	99.1%	99.1%	99.1%	99.1%	99.5%	98.1%	98.6%
测试指标	Dy /(μg/g)	Ho /(μg/g)	Er /(μg/g)	Tm /(μg/g)	Yb /(μg/g)	Lu /(μg/g)	Y /(μg/g)	
检出限	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1	
报出率	100.00%	99.98%	100.00%	99.80%	100.00%	99.86%	100.00%	
重复样合格率	98.1%	98.6%	98.1%	98.6%	98.1%	98.6%	98.1%	

配分曲线与上地壳一致(图 2)。上述结果表明,表层沉积物样品与深层样品稀土含量具有一致性,都继承了岩石风化产物,总体受上地壳岩石背景控制,汇水域沉积物是研究稀土空间分布的理想介质。

3 稀土成矿远景区预测

地球化学是发现稀土分布、研究稀土矿床、进行资源潜力评价的有效方法。本文首次获得了全国岩石和汇水域沉积物中稀土元素超富集空间分布,

可以全面对我国稀土成矿区带进行划分和评价。

以稀土含量累计频率 75%对应的含量值(211 μg/g)为异常下限,全国共圈定稀土地球化学异常区 31 处,综合考虑稀土元素地球化学空间分布、地质背景、矿床分布以及大地构造,圈定 28 处稀土成矿远景区(图 3, 编号 1~28),其中具有高浓度富集中心(大于累计频率 85%对应的含量值 236 μg/g)异常 14 处(图 3, 编号 C1~C14)。与陈毓川等(2016)划分的 31 个稀土成矿带对比,新圈定了 11 个稀土矿

表 2 我国汇水域沉积物和岩石稀土元素基准值统计特征
Table 2 Statistical parameters of REEs in catchment sediments and rocks

元素/ (μg/g)	汇水域沉积物										全国岩石 背景值	地壳丰度
	层位	样品数	最小值	中位数	75% 高背景	85% 异常下限	最大值	算术 均值	几何 均值	背景值		
La	浅层	3392	2.26	32.7	39.5	44.0	1597	34.8	31.6	32.4	28.1	30
	深层	3390	5.06	31.8	39.5	44.1	1756	33.5	30.1	31.6		
Ce	浅层	3392	4.46	63.8	77.2	85.8	2354	67.7	61.7	63.2	55.2	60
	深层	3390	9.59	62.0	77.3	86.4	2527	65.0	58.8	61.6		
Pr	浅层	3392	0.53	7.62	9.02	9.88	217	7.94	7.33	7.52	6.61	6.7
	深层	3390	1.15	7.37	9.01	9.95	231	7.63	7.00	7.31		
Nd	浅层	3392	1.89	28.3	33.5	36.7	577	29.3	27.2	27.9	25.1	27
	深层	3390	4.13	27.4	33.5	36.9	606	28.2	26.0	27.2		
Sm	浅层	3392	0.39	5.32	6.22	6.76	55.5	5.44	5.09	5.21	4.75	5.3
	深层	3390	0.81	5.13	6.20	6.82	51.4	5.24	4.86	5.08		
Eu	浅层	3392	0.096	1.13	1.29	1.39	10.3	1.14	1.08	1.10	0.99	1.3
	深层	3390	0.21	1.09	1.28	1.39	10.6	1.11	1.05	1.07		
Gd	浅层	3392	0.35	4.65	5.44	5.91	41.6	4.71	4.43	4.57	4.18	4.0
	深层	3390	0.67	4.51	5.41	5.94	41.6	4.54	4.24	4.43		
Tb	浅层	3392	0.064	0.75	0.88	0.96	6.16	0.76	0.72	0.74	0.67	0.65
	深层	3390	0.11	0.73	0.88	0.96	6.16	0.74	0.69	0.72		
Dy	浅层	3392	0.35	4.47	5.15	5.54	37.9	4.47	4.23	4.36	3.87	3.8
	深层	3390	0.65	4.34	5.11	5.57	37.9	4.32	4.06	4.24		
Ho	浅层	3392	0.075	0.86	1.00	1.08	8.06	0.87	0.82	0.85	0.74	0.8
	深层	3390	0.12	0.84	0.99	1.08	8.06	0.84	0.79	0.82		
Er	浅层	3392	0.22	2.48	2.87	3.09	22.5	2.49	2.35	2.42	2.13	2.1
	深层	3390	0.35	2.41	2.84	3.10	22.5	2.41	2.27	2.36		
Tm	浅层	3392	0.038	0.41	0.48	0.51	3.30	0.41	0.39	0.40	0.34	0.30
	深层	3390	0.058	0.39	0.47	0.52	3.30	0.40	0.37	0.39		
Yb	浅层	3392	0.24	2.58	2.97	3.20	19.6	2.58	2.45	2.51	2.15	2.0
	深层	3390	0.37	2.51	2.96	3.22	19.6	2.51	2.37	2.45		
Lu	浅层	3392	0.037	0.42	0.48	0.52	3.25	0.42	0.40	0.41	0.33	0.35
	深层	3390	0.060	0.41	0.48	0.52	3.25	0.41	0.38	0.40		
Y	浅层	3392	2.04	23.7	27.6	29.9	390	24.0	22.6	23.2	20.5	24
	深层	3390	3.34	23.1	27.4	29.9	390	23.2	21.7	22.6		
ΣLREE	浅层	3392	9.63	139	166	184	4805	40.7	38.4	39.4	121	130
	深层	3390	22.1	135	167	185	5182	39.4	36.9	38.5		
ΣHREE	浅层	3392	3.41	40.4	46.8	50.6	533	146	134	138	35.0	38.0
	深层	3390	5.80	39.3	46.6	50.8	533	141	128	134		
ΣREE	浅层	3392	13.0	180	212	233	4930	187	173	178	157	168
	深层	3390	28.7	175	213	236	5312	180	166	173		

注: 沉积物背景值为反复剔除 3 倍标准偏差后的平均值, 单位, μg/g。全国岩石背景值为“中国地球化学基准值计划”在全国采集的 11 699 件岩石样品一次剔除 3 倍标准偏差后的平均值, 地壳丰度引自 Wedepohl(1995)。

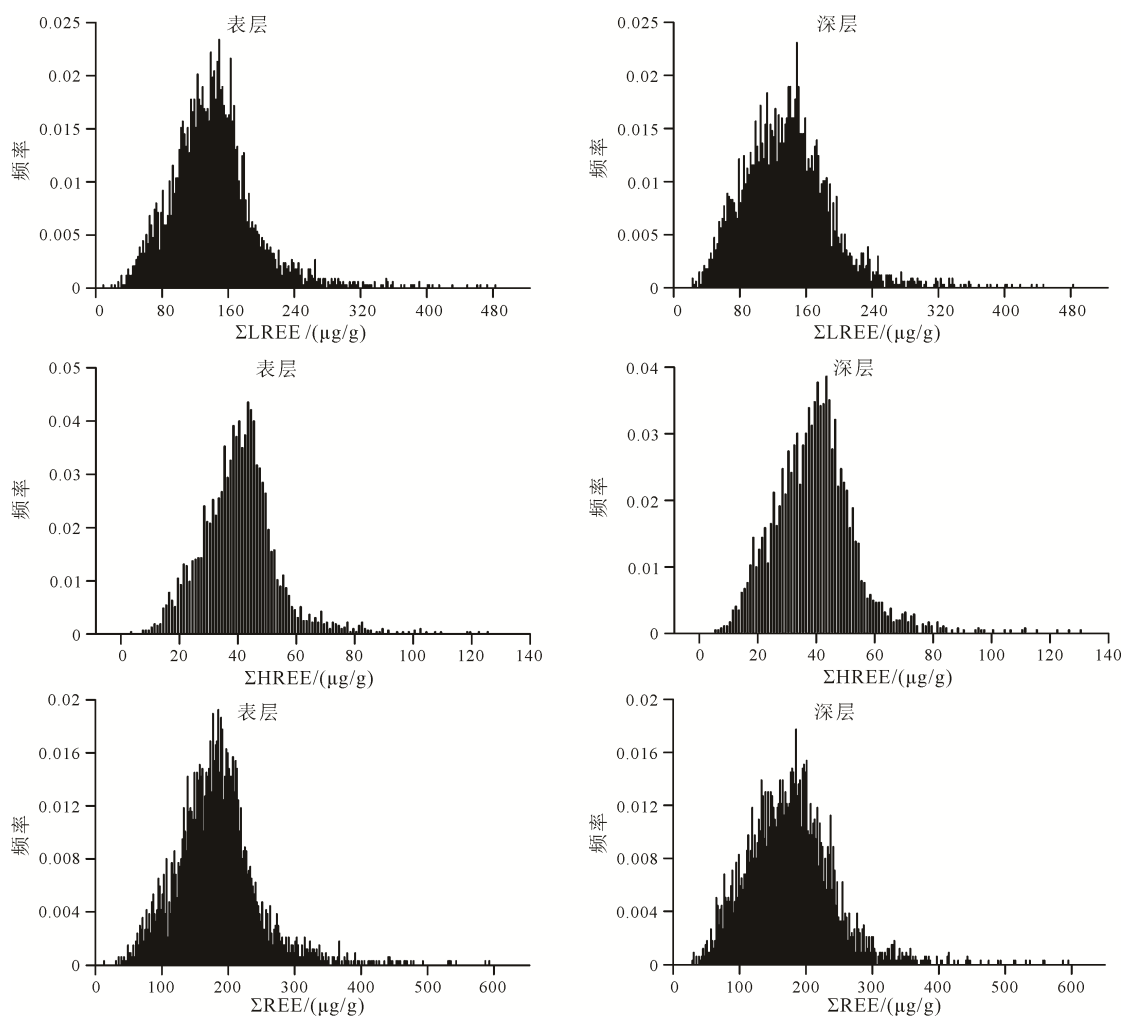
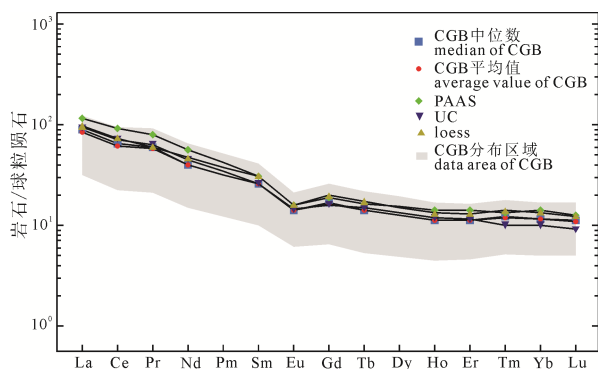


图1 全国汇水域沉积物稀土元素数据概率分布图

Fig. 1 Histograms displaying the distribution of TREE in catchment sediments of China



PAAS—澳大利亚后太古界代平均页岩(McLennan, 1989);

UC—上地壳(Rudnick and Gao, 2003); loess—黄土(吴明清等, 1995)。

PAAS—Australian Post-Archean average shale (McLennan, 1989); UC—upper crust (Rudnick and Gao, 2003); loess (after WU, 1995)。

图2 稀土配分曲线对比图

(球粒陨石数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns
(chondrite data after Sun and McDonough, 1989)

远景区(表3, 黑体字)。稀土矿远景区与已有成矿带相比延伸范围更广, 异常核心区更为集中和明确, 提供了更多潜在找矿靶区。如白云鄂博远景区不仅限于已知的白云鄂博矿床, 向西延伸到达乌拉特后

旗一带, 其中包含3处浓集中心; 攀西稀土成矿带向北可延伸到松潘—甘孜地区, 向南与贵州织金大型磷块岩型稀土矿、云南普雄风化壳型稀土矿相连, 一直延伸到越南境内; 三江稀土远景区往南可以一直延伸到缅甸、老挝境内; 新圈定了西藏中东部稀土地球化学远景区, 富集轻稀土和重稀土, 地球化学异常主要分布在拉萨—那曲—林芝地区。本文对已知成矿带, 及已发现了稀土矿的地球化学异常不再重复讨论, 仅根据新发现异常的浓集中心分布, 对新圈定的9处核心靶区进行阐述。

(1) 白云鄂博外围以西地区(C1)

白云鄂博矿是一座世界罕见的多金属共生矿床, 分布在东西长18 km, 南北宽约3 km, 相对高度约200 m, 总面积48 km²的范围内, 白云鄂博矿床位于华北克拉通的北部边缘, 其北部与中亚早古生代活动大陆边缘毗邻, 在中亚造山带和华北克拉通之间, 有一条乌兰宝力格大断裂, 断裂南部出露有白云鄂博群, 其不整合覆盖于古元古代的基底杂岩之上 (Fan et al., 2016; Liu et al., 2018; 王凯怡等, 2018), 含矿地层即为中元古代白云鄂博群(朱祥坤等,

2012)。白云鄂博是以轻稀土矿为主, 具有高强度轻稀土浓集中心, 稀土总量达到 800 $\mu\text{g/g}$, 轻稀土总量 704 $\mu\text{g/g}$ 。进一步的加密采样, 该异常被分解为 3 处异常中心(图 4, 图 5), 分别位于白云鄂博(白云鄂博异常, 标注为 REE01)、白云鄂博与乌拉特中旗之间的巴音朱日和苏木(简称巴音异常, 标注为 REE02)、乌拉特后旗的赛乌素镇(简称赛乌素异常, 标注为 REE03)(图 4), 稀土总量最大值分别为 800 $\mu\text{g/g}$ 、728 $\mu\text{g/g}$ 和 432 $\mu\text{g/g}$, 轻稀土和重稀土比值分别为 12.8、5.53、5.36, 白云鄂博异常轻重稀土比值显著高于巴音异常和赛乌素异常, 表明白云鄂博更富集轻稀土, 巴音和赛乌素异常更富集重稀土。从图 4 和图 5 也可以看出, 巴音和赛乌素异常与白云鄂博异常的不同点是同时存在重稀土异常, 而白云鄂博重稀土含量相对较低。这两处新发现的异常是否存在不同于白云鄂博型的稀土矿值得进一步研究。

(2) 华南稀土元素超常富集区(C2)

该异常区(编号 01)和富集区(C2)广泛分布在赣、闽、粤、桂一带, 为全国最大的稀土元素地球化学异常, 平均值分别为 269.4 $\mu\text{g/g}$, 最大值

559.1 $\mu\text{g/g}$ 。轻稀土和重稀土都富集, 但重稀土分布范围和强度高于轻稀土。分布有多个稀土异常中心区, 主要与酸性花岗岩密切相关, 与全国其他地区相比, 华南造山带稀土总量最高, 以富集重稀土为特征。该地球化学省内发育大量花岗岩风化壳淋积型稀土矿床, 是我国最大的重稀土产区, 仅赣州就占全国 30% 的重稀土储量(稀土行业调查报告, 2011)。本文预测区面积更大, 往北延伸到江浙地区, 并新发现多个轻稀土、重稀土异常富集中心, 值得进一步工作。

(3) 松潘—甘孜—攀西地区(C7)

本文发现松潘—甘孜—攀西稀土异常向西北延伸到甘孜、石渠一带, 富集轻稀土和重稀土, 以富集轻稀土为主, 平均值 318.3 $\mu\text{g/g}$, 最大值 5312.4 $\mu\text{g/g}$, 是全国最高值, 具有 3 层浓集中心。大地构造位于松潘—甘孜造山带, 出露岩石类型主要为三叠系复理石沉积及火山岩, 另外, 印支期、燕山期中酸性侵入岩广泛出露。前人经过对稀土成矿规律研究, 确定了一条北起冕宁, 经德昌, 南至会理约 300 km 的攀西稀土成矿带, 稀土矿床主要

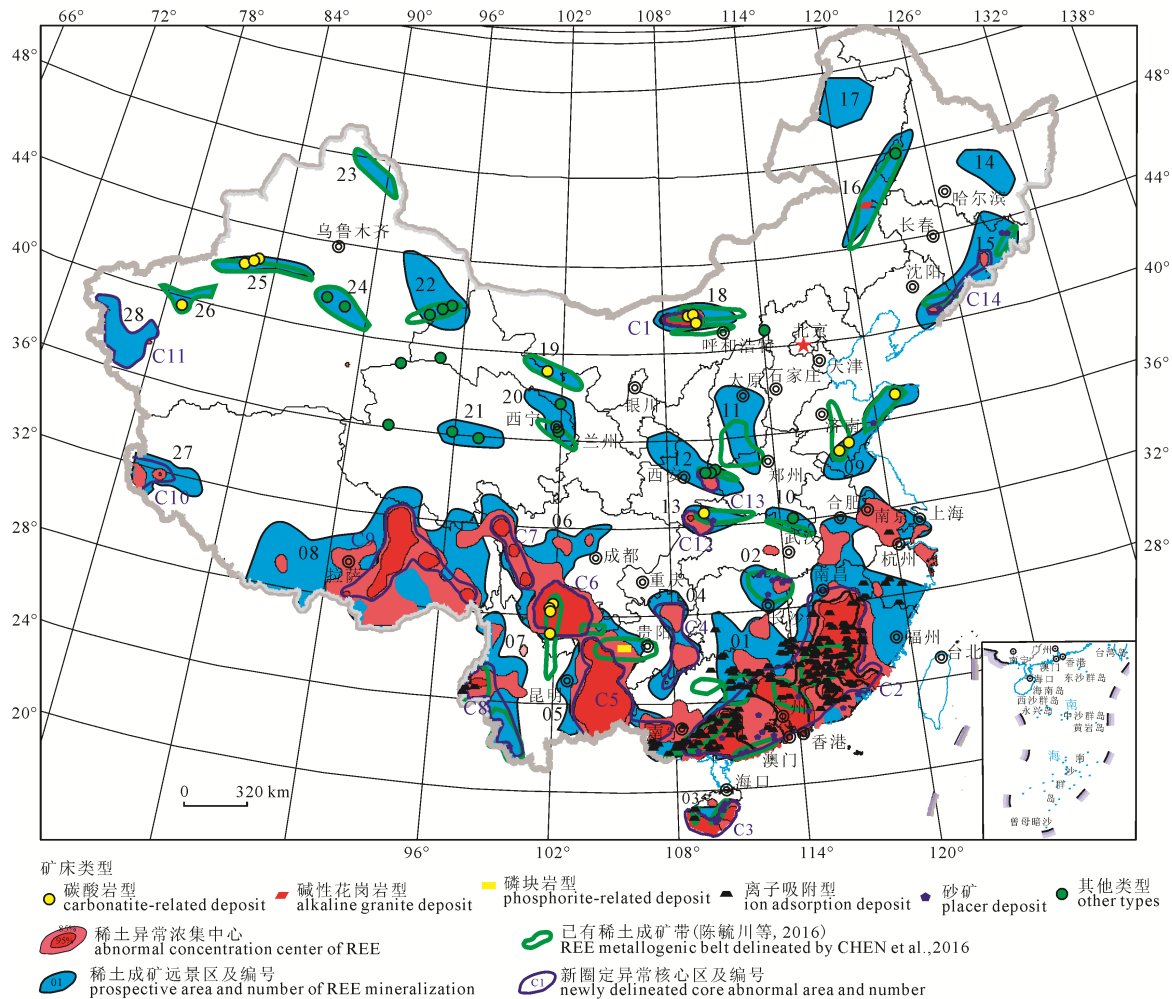


图 3 基于地球化学异常的中国稀土矿成矿远景区预测
Fig. 3 The distribution of metallogenetic prospective provinces of REE in China based on geochemical enrichment anomalies

表3 稀土成矿远景区与已有成矿区带对比表
Table 3 Comparison between metallogenetic prospective provinces and existing metallogenetic belts of REE

稀土地球化学远景区	已有矿床	预测远景区(本文)与已知 稀土成矿带(陈毓川等, 2016)对比
白云鄂博—乌拉特后旗稀 土远景区(编号 18)和异常 核心区(编号 C1)	典型类型: 碳酸岩型(白云鄂博型) 典型矿床: 白云鄂博	分布范围东部与陈毓川等(2016)划分的稀土成矿 带基本一致; 西部新圈定 2 处异常核心区(C1)。轻稀土和重稀 土异常皆有, 是否存在新类型需要进一步研究
华南稀土远景区(01)和 异常核心区(C2)	矿床类型: 风化壳离子吸附型、花岗岩型、砂矿 典型矿床: 江西七零一、七零二、八零七矿、上 犹长岭, 湖南岳阳口、三郎堰、平江南江桥、湘 阴望湘, 广东阳西南南海等	本文预测区面积更大, 往北延伸到江浙地区; 新发现多个稀土异常富集中心, 具有新的重要 找矿潜力
松潘—甘孜—攀西稀土远 景区(编号 06)和核心区 (C6、C7)	矿床类型: 碱性岩-碳酸岩型 典型矿床: 牦牛坪、羊房沟、木洛、德昌大陆槽	陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带位于攀西裂谷; 本文异常核心区除位于攀西裂谷(C6), 向北延 伸到松潘—甘孜地区的核心异常(C7), 包含轻 稀土、重稀土异常
贵州织金—蒙自—中越边 境稀土远景区(编号 05)和 核心区(C5)	矿床类型: 磷块岩型、风化壳离子吸附型 典型矿床: 贵州织金、建水普雄	陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带位于织金—贵 阳地区; 本文发现异常延伸到蒙自—越南边境(C5 核心 区), 以轻稀土为主, 包含重稀土异常, 存在潜 在磷块岩型、风化壳离子吸附型、沉积泥岩型矿 床
三江中南段—中、缅、老边 境稀土远景区(编号 07)和 核心区(C8)	矿床类型: 风化壳离子吸附型、砂矿 典型矿床: 云南勐海勐往、水桥寺、上允、勐往、 土官寨、蕨叶坝、尖山脚、陇川龙安、营盘山、 大曼别、一碗水等	陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带位于陇川和勐 海地区; 本文发现异常规模更大, 往北延伸到腾冲、福贡, 往南可延伸到老挝、缅甸境内。包含轻稀土和重 稀土异常
西藏中东部雅鲁藏布江远 景区(编号 08)和核心区(C9)	无	本文新发现稀土远景区, 包含轻稀土、重稀土异 常, 轻稀土异常面积大, 异常含量高
西藏札达稀土远景区(编号 27)和异常核心区(C10)	无	本文新发现稀土远景区, 轻稀土异常强
黔东正安—荔波稀土远景 区(编号 04)异常核心区(C4)	无	本文新发现稀土远景区, 包含轻稀土和重稀土 异常, 潜在磷块岩型
中塔边境稀土远景区(编号 28)和异常核心区(C11)	无	本文新发现稀土远景区, 多处轻稀土和重稀土 异常
黑龙江佳木斯—鸡西稀土 远景区(编号 14)	无	本文新发现稀土远景区, 包含重稀土异常
内蒙古根河—额尔古纳稀 土远景区(编号 17)	无	本文新发现稀土远景区, 弱轻稀土、重稀土异常
青海格尔木—玛多稀土远 景区(编号 21)	无	本文新发现稀土远景区
湘鄂洞庭湖围缘稀土远景 区(编号 02)	矿床类型: 砂矿 典型矿床: 湖北通城隍水、石首华堰、华容三郎 堰、湖南湘阴	分布范围与陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带基 本一致, 主要为轻稀土异常
海南稀土远景区(编号 03) 和核心区(C3)	矿床类型: 砂矿、风化壳离子吸附型 典型矿床: 海南万宁保定、琼海博鳌、文昌铺前、 昌江	分布范围与陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带基 本一致, 包含轻稀土和重稀土异常
山东微山—威海稀土远景 区(编号 09)	矿床类型: 正长岩-碳酸岩型 典型矿床: 山东微山鄱山燕山期正长岩稀土矿, 山东中部雪野—八陡—胡家庄等地燕山期碳酸 岩脉型稀土矿	分布范围与陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带基 本一致, 轻稀土异常
桐柏—大别稀土远景区 (编号 10)	矿床类型: 浅粒岩-变粒岩 典型矿床: 湖北应山广水、大悟邓家湾	分布范围与陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带基 本一致
山西古县—河南洛阳稀土 远景区(编号 11)	矿床类型: 古风化壳型铝土矿-黏土岩型 典型矿床: 山西古县下冶多沟、沁源大峪、平陆 曹川、河南郁山	分布范围与基本一致, 往北延伸到太原地区, 轻 稀土、重稀土异常

续表 3

稀土地球化学远景区	已有矿床	预测远景区(本文)与已知 稀土成矿带(陈毓川等, 2016)对比
甘肃庆阳—陕西洛南—河南嵩县稀土远景区(编号 12)和核心区(C13)	矿床类型: 碱性岩-碳酸岩型 典型矿床: 陕西洛南黄龙铺、华阴华阳川“401”, 河南嵩县黄水庵	分布范围与陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带基本一致; 面积更大, 北东向延伸至甘肃庆阳地区, 主要为轻稀土异常, 在甘肃庆阳合水、宁县地区重稀土异常明显
陕西安康—湖北房县南秦岭稀土远景区(编号 13)和核心区(C12)	矿床类型: 碱性岩-碳酸岩型 典型矿床: 湖北竹山庙垭	分布范围与陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带基本一致, 主要为轻稀土和重稀土异常
辽吉—长白山稀土远景区(编号 15)和核心区(C14)	矿床类型: 正长岩、浅粒岩-变粒岩、砂矿 典型矿床: 辽宁凤城赛马、翁泉沟、生铁岭、红卫星	分布范围与陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带位于辽宁凤城和黑龙江长白山地区; 本文发现这两个地区稀土异常连成一片, 主要为轻稀土地球化学异常
黑龙江齐齐哈尔—内蒙古扎鲁特旗兴蒙稀土远景区(编号 16)	矿床类型: 碱性花岗岩型 典型矿床: 内蒙古巴尔哲、黑龙江碾子山	分布范围与陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带基本一致, 弱轻稀土异常
内蒙古阿拉善右旗—甘肃永昌稀土远景区(编号 19)	矿床类型: 碱性岩-碳酸岩型、磷块岩型 典型矿床: 阿拉善桃花拉山、永昌马房子沟	分布范围与陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带基本一致
青海平安—甘肃武威稀土远景区(编号 20)	矿床类型: 花岗伟晶岩型 典型矿床: 青海平安上庄、北祁连甘肃古堡泉、庙庙井	分布范围与陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带基本一致, 但范围更大, 往北延伸到甘肃境内
新疆哈密石英滩—巴里坤稀土远景区(编号 22)	矿床类型: 花岗伟晶岩型。 典型矿床: 新疆哈密石英滩, 红柳井碱长花岗岩型	分布范围与陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带基本一致; 分布范围更大, 往北延伸到阿里坤地区, 主要为重稀土异常
新疆阿勒泰稀土远景区(编号 23)	矿床类型: 花岗伟晶岩型、沉积变质岩型 典型矿床: 新疆富蕴康尔图、汤宝其, 福海等华力西期花岗伟晶岩, 蒙库-克孜勒塔斯断裂沉积变质型稀土矿	分布范围与陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带基本一致; 不同的是主要为重稀土异常
新疆尉犁稀土远景区(编号 24)	矿床类型: 碳酸岩型 典型矿床: 新疆尉犁且干布拉克、阔克塔格西	分布范围与陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带分布范围一致
新疆拜城—库尔勒稀土远景区(编号 25)	矿床类型: 碱性花岗岩型 典型矿床: 新疆拜城波孜果尔、依兰里克、克其克果勒	分布范围与陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带分布范围一致
新疆巴楚稀土远景区(编号 26)	矿床类型: 碱性岩-碳酸岩型 典型矿床: 新疆巴楚瓦吉尔塔格、麻扎尔塔格	分布范围与陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带分布范围一致

注: 表中黑体字表示新圈定的稀土矿远景区。

有四川冕宁牦牛坪、羊房沟、木洛、德昌大陆槽稀土矿等一系列大中型碳酸岩-碱性岩型稀土矿(王登红等, 2002; 侯增谦等, 2008; Xu et al., 2012; Xie et al., 2015)。本文发现稀土异常不局限于攀西裂谷稀土成矿带, 在攀西裂谷的周缘存在大面积稀土异常, 具有较大的找矿潜力。区内岩浆活动强烈, 生成了系列齐全的火成岩组合, 如晋宁期中酸性火山岩及侵入岩, 海西期峨眉山喷溢玄武岩、印支期和喜山期碱性杂岩等。区内地层主要为前震旦系会理群、震旦—寒武系观音崖组和灯影组、侏罗系白果湾群和益门组。该地区以寻找碱性岩-碳酸岩型稀土矿为主, 另外峨眉山玄武岩稀土含量较高(达到 378 μg/g), 在该地区与玄武岩有关的稀土矿需要重

点关注。这一地区是寻找碱性岩型、风化壳型、磷块岩型和沉积泥岩型稀土矿的有利地区。

(4) 贵州织金—蒙自—中越边境地区(C5)

新圈定贵州织金—蒙自—中越边境地区地球化学异常, 富集轻稀土和重稀土。平均值 353.2 μg/g, 最大值 1163.0 μg/g, 是全国次高含量点。同时富集轻稀土和重稀土, 重稀土异常面积大, 含量高, 有贵州织金磷块岩型、云南普雄离子吸附型稀土矿, 往南延伸到越南境内, 与越南洞泡稀土矿相连。该地区稀土矿类型多样, 以磷块岩性和风化壳型稀土矿为主, 是多稀土矿种的聚集区。在云南广西交界地区分布有大量的铝土矿(高兰等, 2014), 该地区稀土含量高, 可能与铝土矿有关。在贵阳中东部地区

分布有织金新华等磷矿(薛天星等, 2011), 该地区稀土含量高与磷矿有关。出露岩石类型主要为上古生界碳酸盐岩和三叠系复理石沉积, 下古生界碎屑岩、碳酸盐岩零星出露。燕山期、吕梁期花岗岩沿元江、中越边境地区广泛出露。值得注意的是新近系泥岩有稀土的超常富集现象, 含量超过 500 $\mu\text{g/g}$ 。该地区找矿方向以磷块岩型、泥岩型、风化壳离子吸附型和铝土矿型稀土矿有利选区。

(5) 三江中南段—中国、缅甸、老挝边界地区(C8)

三江中南段稀土异常分布于北起腾冲、福贡, 向南延伸到中国、缅甸、老挝边界地区, 主体异常位于腾冲地块, 异常含量平均值达 287 $\mu\text{g/g}$, 最大值 402.4 $\mu\text{g/g}$ 。稀土元素高含量主要在新近系泥岩、白垩纪花岗岩和全新世火山岩, 其中新近系芒棒组泥岩稀土含量达 444 $\mu\text{g/g}$ 。除白垩纪花岗岩以外, 腾冲地块芒棒组泥岩和全新世火山岩可能具有形成稀土矿的潜力。在三江中南段发现了龙安稀土矿、水

桥稀土矿、勐海勐往稀土矿, 构成了西南三江中南段稀土成矿带。陈毓川等(2016)划分的稀土成矿带位于陇川和勐海地区, 本文发现异常规模更大, 往北延伸到腾冲、福贡, 往南可延伸到老挝、缅甸境内, 在中缅边境三十五号界桩缅方一侧南木洼至木提松区域发现了“拉达阁稀土矿区”。近年来, 在西南三江中南段逐步发现了一系列花岗岩、正长岩、变质岩、玄武岩风化壳型稀土矿床(陆蕾等, 2020)。在腾冲地块, 腾冲—瑞丽一带近年来取得了稀土勘查的重要突破, 先后发现了陇川、营盘山、百脑花、小龙河、土官寨等一批中、大型稀土矿产(李家云和李治平, 2010; 李建忠等, 2017)。该地区为风化壳离子吸附型、泥岩型稀土矿主要靶区。

(6) 西藏中东部雅鲁藏布江远景区(C9)

稀土异常区主要沿班公湖—怒江缝合带和雅鲁藏布江缝合带分布。浓集区主要在拉萨—那曲—林芝地区。异常平均值 306.2 $\mu\text{g/g}$, 最大值 1107 $\mu\text{g/g}$ 。

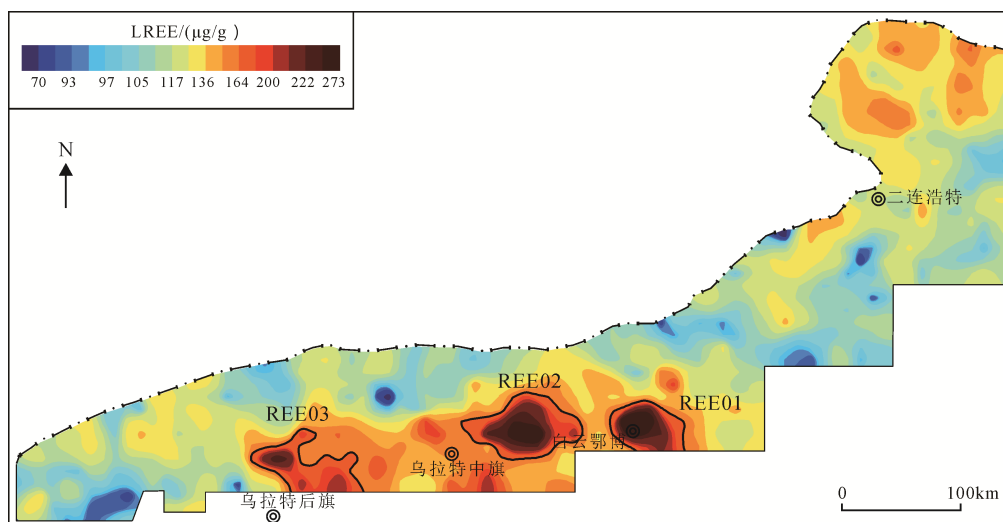


图 4 白云鄂博及邻区轻稀土地球化学图

Fig. 4 Geochemical maps of LREE in Bayan Obo region

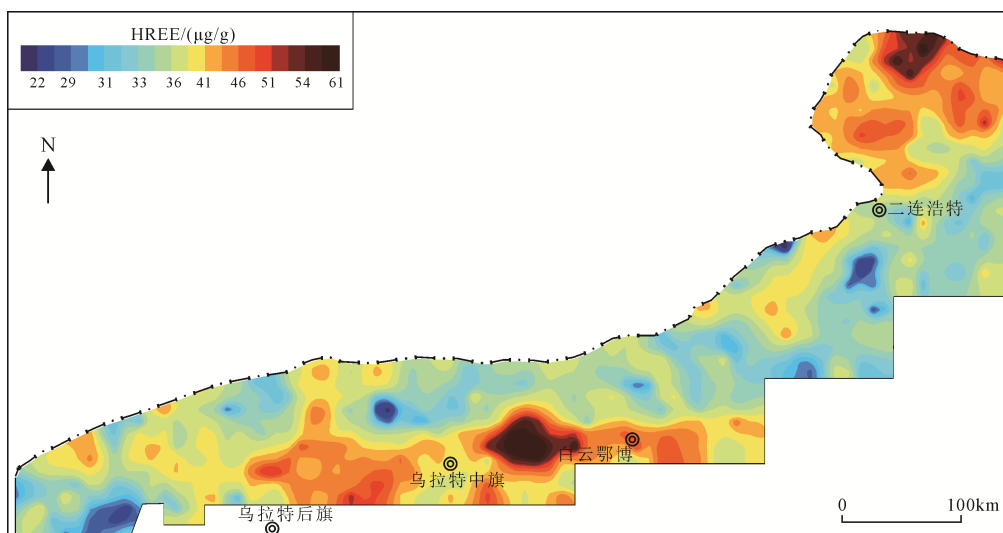


图 5 白云鄂博及邻区重稀土地球化学图

Fig. 5 Geochemical maps of HREE in Bayan Obo region

该地区分布有大量中—新生代花岗岩,其次为中生代砂岩、泥岩、灰岩等。找矿方向以碱性花岗岩、花岗伟晶岩和碱性岩-碳酸岩等为主。

(7)西藏札达地区(C11)

异常位于中印边界札达地区,主要富集轻稀土,具有三层套合结构。异常平均值 $329.0 \mu\text{g/g}$, 最大值 $429.3 \mu\text{g/g}$, 大地构造位于喜马拉雅造山带,主要岩性为晚古生界碎屑岩、碳酸盐岩和中生代碎屑岩、碳酸盐岩、页岩和元古宇变质岩,岩浆活动主要为喜马拉雅期花岗岩。

(8)黔东正安—荔波稀土远景区(C4)

在贵州东部正安—荔波一带,新圈定稀土地球化学异常,富集轻稀土和重稀土,具有3层浓集中心。异常平均值 $267.3 \mu\text{g/g}$, 最大值 $299.0 \mu\text{g/g}$, 同时富集轻稀土和重稀土。出露岩石主要为古生代和中生代碳酸盐岩、碎屑岩、硅质岩和元古宇变质岩。在该地区分布有开阳、瓮安等震旦纪磷块岩型磷矿,因此,在该地区以寻找磷块岩型稀土矿为主。

(9)西昆仑中塔边界地区(C10)

异常平均值 $287.3 \mu\text{g/g}$, 最大值 $429 \mu\text{g/g}$, 主要富集重稀土。位于中塔边境地区,主要富集重稀土。在该地区主要地层为古生代复理石及火山岩和元古宇变质岩,另外广泛发育华力西期花岗岩。在西昆仑塔什库尔干地区古元古界地层沉积变质型铁矿中含有大量的稀土矿,找矿方向以寻找伴生稀土矿为主。

传统稀土矿主要为碱性岩-碳酸岩相关的内生稀土矿和风化淋滤作用下的离子吸附型稀土矿(袁忠信和白鸽, 2001; 王登红等, 2013)。近年来随着稀土战略地位的提升和勘查力度的加大,不断在发现新类型稀土矿,如与原生铝土矿伴生的稀土资源(张尚清等, 2018; 龙克树等, 2019),与二叠纪宣威组玄武岩次生风化有关的黏土岩型锂-稀土矿(温汉捷等, 2020),与磷块岩有关的沉积型稀土矿等(陈满志等, 2019)。不断涌现的新类型稀土矿,大大开阔了稀土勘查视野。这些稀土富集中心的发现,除了具有发现潜在传统类型稀土矿以外,可能对发现新类型稀土矿具有重要指示意义。

4 结论

本文利用全国地球化学基准数据,首次系统阐述稀土元素地球化学基准值特征。全国岩石稀土背景值($157 \mu\text{g/g}$)与地壳丰度($168 \mu\text{g/g}$)基本一致。全国汇水域沉积物稀土总量背景值在表层样品($178 \mu\text{g/g}$)和深层样品($173 \mu\text{g/g}$)的非常接近,但都略高于全国岩石背景值($157 \mu\text{g/g}$)。表明稀土元素从原生到表生风化过程发生了轻微富集作用,富集系

数为1.1左右。轻稀土和重稀土比值与全国岩石轻稀土和重稀土比值一致,均为3.5。上述结果表明,表层沉积物样品与深层样品稀土含量具有一致性,都继承了岩石风化产物,总体受上地壳岩石背景控制,汇水域沉积物是研究稀土空间分布的理想介质。

以汇水域沉积物稀土含量累计频率75%对应的含量值($211 \mu\text{g/g}$)为异常下限,全国共圈定稀土地球化学异常富集区35处。综合考虑稀土元素超常富集区地球化学特征、地质背景、矿床分布以及大地构造,本文圈定28处稀土矿远景区。与陈毓川等(2016)划分的31个稀土成矿带对比,浓集中心更为明确,新圈定异常核心靶区9处,分别位于白云鄂博外围以西地区、华南地区、贵州织金—蒙自—中越边境地区、松潘—甘孜—攀西地区、中—缅—老边界地区、黔东正安—荔波地区、西藏中东部、西昆仑中塔边界地区、西藏札达地区。这些稀土富集中心的发现,对发现新的稀土矿或已有稀土矿外围发现新的稀土矿具有重要指示意义。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research & Development Program of China (No. 2016YFC0600600), National Special Research Fund for Deep Exploration Technology and Experiment Project (No. SinoProbe-04), and China Geological Survey (No. DD20190451).

参考文献:

- 白鸽. 2012. 我对白云鄂博铁铌稀土矿床的研究过程及往见新识[J]. 地质学报, 86(05): 679-682.
- 陈毓川, 王登红, 徐志刚. 2016. 中国重要矿产和区域成矿规律[M]. 北京: 地质出版社: 344-368.
- 陈满志, 付勇, 夏勇, 谢卓君, 周克林, 张鹏. 2019. 中国磷块岩型稀土矿资源前景分析[J]. 矿物学报, 39(04): 345-358.
- 迟清华, 鄢明才. 2007. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社: 148.
- 高兰, 王登红, 熊晓云, 易承伟. 2014. 中国铝矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 88(12): 2284-2295.
- 侯增谦, 田世洪, 谢玉玲, 袁忠信, 杨竹森, 尹淑苹, 费红彩, 邹天人, 李小渝, 杨志明. 2008. 川西冕宁-德昌喜马拉雅期稀土元素成矿带: 矿床地质特征与区域成矿模型[J]. 矿床地质, 27(2): 145-176.
- 李家云, 李治平. 2010. 云南陇川地区稀土矿床成矿预测[J]. 云南地质, 29(04): 429-430.
- 李建忠, 陆生林, 吴文贤, 丁俊, 王保弟, 赵作新, 崔子良. 2017. 云南省腾冲市小龙河锡稀土多金属矿田新知及其稀土矿的发现[J]. 中国地质调查, 4(02): 9-21.
- 李童斐, 夏庆霖, 汪新庆, 刘岳, 常力恒, 冷帅. 2018. 中国稀土矿资源成矿地质特征与资源潜力分析[J]. 地学前缘, 25(3): 95-106.
- 龙克树, 付勇, 陈蕊, 叶远谋, 严爽, 陈满志. 2019. 黔北铝土矿稀土元素富集机制——以新民铝土矿为例[J]. 矿物学报, 39(04): 443-454.

- 陆蕾, 王登红, 王成辉, 赵芝, 冯文杰, 徐晓春, 陈晨, 钟海仁. 2020. 云南离子吸附型稀土矿成矿规律[J]. 地质学报, 94(01): 179-191.
- 王登红, 杨建民, 闫升好, 陈毓川, 徐珏. 2002. 四川牦牛坪碳酸岩的同位素地球化学及其成矿动力学[J]. 成都理工学院学报, (05): 539-544.
- 王登红, 赵芝, 于扬, 赵汀, 李建康, 代晶晶, 刘新星, 何哈哈. 2013. 离子吸附型稀土资源研究进展、存在问题及今后研究方向[J]. 岩矿测试, 32(05): 796-802.
- 王凯怡, 张继恩, 方爱民, 董策, 胡辅佑. 2018. 白云鄂博矿床成因——矿体内霓长岩化成矿作用与赋矿白云岩的联系[J]. 岩石学报, 34(3): 785-798.
- 王学求, 刘汉粮, 王玮, 周建, 张必敏, 徐善法. 2020. 中国锂矿地球化学背景与空间分布: 远景区预测[J]. 地球学报, 41(6): 797-806.
- 王学求, 徐善法, 程志中, 刘红艳, 师淑娟. 2006. 国际地球化学填图新进展[J]. 地质学报, 80(10): 1598-1606.
- 王学求, 谢学锦, 张本仁, 张勤, 迟清华, 侯青叶, 徐善法, 聂兰仕, 张必敏. 2010. 地壳全元素探测——构建“化学地球”[J]. 地质学报, 84(06): 854-864.
- 王学求. 2012. 全球地球化学基准: 了解过去, 预测未来[J]. 地学前缘, 19(3): 7-18.
- 王学求, 周建, 徐善法, 迟清华, 聂兰仕, 张必敏, 姚文生, 王玮, 刘汉粮, 刘东盛, 韩志轩, 柳青青. 2016. 全国地球化学基准网建立与土壤地球化学基准值特征征[J]. 中国地质, 43(5): 1469-1480.
- 温汉捷, 罗重光, 杜胜江, 于文修, 顾汉念, 凌坤跃, 崔隸, 李阳, 杨季华. 2020. 碳酸盐黏土型锂资源的发现及意义[J]. 科学通报, 65(01): 53-59.
- 吴明清, 文启忠, 潘景瑜, 刁桂仪. 1995. 中国黄土的平均化学成分: 上部大陆地壳的一种典型代表[J]. 岩相古地理, 15(2): 127-136.
- 稀土行业调查报告. 2011. <https://wenku.baidu.com/view/a4b64fd43186bceb19e8bb73.html>.
- 薛天星, 熊先孝, 田升平. 2011. 中国磷矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J]. 化工矿产地质, 33(01): 9-20.
- 袁忠信, 白鸽. 2001. 中国内生稀有稀土矿床的时空分布[J]. 矿床地质, (04): 347-354.
- 袁忠信, 李建康, 王登红, 郑国栋, 姜德波, 陈郑辉, 赵芝, 于杨. 2012. 中国稀土矿产成矿规律[M]. 北京: 地质出版社: 79-83.
- 张勤, 白金峰, 王烨. 2012. 地壳全元素配套分析方案及分析质量监控系统[J]. 地学前缘, 19(03): 33-42.
- 张尚清, 张文旭, 钟庄华, 赵军, 孙凯, 曹亚琪. 2018. 山西省兴县铝土矿稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 中国稀土学报, 36(03): 338-349.
- 朱祥坤, 孙剑. 2012. 内蒙古白云鄂博矿床的稀土矿化时代与期次[J]. 地球学报, 33(6): 845-856.
- nese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, XU Zhi-gang. 2016. Important mineral resources and regional metallogenic regularity in China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 344-368(in Chinese).
- CHENG X, REX N T, WENBO L, JINDRICH K, ANTON R C, WENLEI S. 2012. Comparison of fluorite geochemistry from REE deposits in the Panxi region and Bayan Obo, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 57: 76-89.
- CHI Qing-hua, YAN Ming-cai. 2007. Handbook of elemental abundance for applied geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House: 148(in Chinese).
- DARNLEY A G. 1990. International geochemical mapping: a new global project[J]. Journal of Geochemical Exploration, 39(1): 1-13.
- DARNLEY A G. 1995. International geochemical mapping — a review[J]. Journal of Geochemical Exploration, 55(1): 5-10.
- DAVID B S, XUEQIU W, SHAUN R, ALECOS D. 2012. The IUGS/IAGC Task Group on Global Geochemical Baselines[J]. Earth Science Frontiers, 19(3): 1-6.
- FAN HONG-rui, YANG Kui-feng, HU Fang-fang, LIU Shang, WANG Kai-yi. 2016. The giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, China: Controversy and ore genesis[J]. Earth Science Frontiers, 7(3): 335-344.
- GAO Lan, WANG Deng-hong, XIONG Xiao-yun, YI Cheng-wei. 2014. Summary on Aluminum pre deposits minerogenetic regulation in China[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2284-2295(in Chinese with English abstract).
- HOU Zeng-qian, TIAN Shi-hong, XIE Yu-ling, YUAN Zhong-xin, YANG Zhu-SENG, YIN Shu-ping, FEI Cai-hong, ZOU Tian-ren, LI Xiao-yu, YANG Zhi-ming. 2008. Mian-ning-Dechang himalayan REE belt associated with carbonatite-alkalic complex in eastern Indo-Asian collision zone, southwest China: Geological characteristics of REE deposits and a possible metallogenic model[J]. Mineral Deposits, 27(2): 145-176(in Chinese with English abstract).
- LI Jian-zhong, LU Sheng-lin, WU Wen-xian, DING Jun, WANG Bao-di, ZHAO Zuo-xin, CUI Zi-liang. 2017. New cognition and discovery of rare earth deposits in the Xiaolonghe tin-REE polymetallic orefield of Tengchong in Yunnan Province[J]. Geological Survey of China, 4(02): 9-21(in Chinese with English abstract).
- LI Jia-yun, LI Zhi-ping. 2010. The metallogenesis prognosis of REE deposit in Longchuan area, Yunnan[J]. Yunnan Geology, 29(04): 429-430(in Chinese with English abstract).
- LI Tong-fei, XIA Qing-lin, WANG Xin-qing, LIU Yue, CHANG Li-heng, LENG Shuai. 2018. Metallogenic geological characteristics and mineral resource potential of rare earth element resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 25(3): 95-106.
- LIU Xue-min, WANG Xue-qiu, DE CARITAT P, SALMINEN R. 2015. Comparison of data sets obtained by global-scale geochemical sampling in Australia, China and Europe[J]. Journal of Geochemical Exploration, 148: 1-11.
- LIU Yu-long, LING Ming-xing, WILLIAMS I S, YANG Xiao-yong, WANG C Y, SUN Wei-dong. 2018. The formation of the giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, North China, Mesoproterozoic carbonatite and overprinted Paleozoic dolomitization[J]. Ore Geology Reviews, 92: 73-83.
- LONG Ke-shu, FU Yong, CHEN Rui, YE Yuan-mou, YAN Shuang, CHEN Man-zhi. 2019. The REE enrichment mechanism of bauxite deposits in the Northern Guizhou: A case study of the Xinmin bauxite deposit[J]. Acta Mineralogica Sinica, 39(04): 345-358(in Chinese with English abstract).

References:

- BAI Ge. 2012. My research process and new knowledge of the Bayan Obo Fe-Ni-Nb rare earth deposit[J]. Acta Geologica Sinica, 86(05): 679-682(in Chinese with English abstract).
- CARITATA P D, REIMANN C, SMITH D B, WANG X. 2018. Chemical elements in the environment: Multi-element geochemical datasets from continental- to national-scale surveys on four continents[J]. Applied Geochemistry, 89:150-159.
- CHEN Man-zhi, FU Yong, XIA Yong, XIE Zhuo-jun, ZHOU Ke-lin, ZHANG Peng. 2019. A prospective analysis on REE resources of the phosphorite-type REE ore deposits in China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 39(04): 345-358(in Chinese with English abstract).

- 443-454(in Chinese with English abstract).
- LU Lei, WANG Deng-hong, WANG Cheng-hui, ZHAO Zhi, FENG Wen-jie, XU Xiao-chun, CHEN Chen, ZHONG Hai-ren. 2020. The metallogenic regularity of ion-adsorption type REE deposit in Yunnan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(01): 179-191(in Chinese with English abstract).
- MCLENNAN S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary process[J]. *Review of Mineralogy*, 21: 169-200.
- REIMANN C. 2005. Sub-continental-scale geochemical mapping: sampling, quality control and data analysis issues[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 5: 311-323.
- RUDNICK R L, GAO S. 2003. Composition of the continental crust, in treatise on geochemistry[M]. Oxford: Pergamon, 1-64.
- SUN S S, MCDONOUGH W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London(Special Publications)*: 42(1): 313-345.
- WANG Deng-hong, YANG Jian-min, YAN Shen-hao, CHEN Yu-chuan, XU Yu. 2002. Dynamics of the REE mineralization in Maoniuping area, Sichuan province: isotopic geochemistry of carbonatites[J]. *Jouunal of Chengdu University of Tecknology*, (05): 539-544(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, ZHAO Zhi, YU Yang, ZHAO Ting, LI Jian-kang, DAI Jing-jing, LIU Xin-xin, HE Han-han. 2013. Progress, problems and research orientation of ion-adsorption type rare earth resources[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 32(05): 796-802(in Chinese with English abstract).
- WANG Kai-yi, ZHANG Ji-en, FANG Ai-min, DONG Ce, HU Fu-you. 2018. Genesis of the Bayan Obo deposit, Inner Mongolia: The fenitized mineralization in the ore bodies and its relation to the ore-bearing dolomite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(3): 785-798(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, LIU Han-liang, WANG Wei, ZHOU Jian, ZHANG Bi-min, XU Shan-fa. 2020. Geochemical Abundance and Spatial Distribution of Lithium in China: Implications for Potential Prospects[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(6): 797-806(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, XU Shan-fa, CHENG Zhi-zhong, LIU Hong-yan, SHI Shu-juan. 2006. Progress on international geochemical mapping[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(10): 1598-1606(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, XIE Xue-jing, ZHANG Ben-ren, ZHANG Qin, CHI Qing-hua, HOU Qing-ye, XU Shan-fa, NIE Lan-shi, ZHANG Bi-min. 2010. China geochemical probe: making "geochemical earth"[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(06): 854-864(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu. 2012. Global geochemical baselines: Understanding the past and predicting the future[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 7-18(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu. 2015. China geochemical baselines: Sampling methodology[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 148: 25-39.
- WANG Xue-qiu, ZHOU Jian, XU Shan-fa, CHI Qing-hua, NIE Lan-shi, ZHANG Bi-min, YAO Wen-sheng, WANG Wei, LIU Han-liang, LIU Dong-sheng, HAN Zhi-xuan, LIU Qing-qing. 2016. China soil geochemical baselines networks: Data characteristics[J]. *Geology in China*, 43(5): 1469-1480(in Chinese with English abstract).
- WEDEPOHL K H. 1995. The composition of the continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 11(62): 1959-1975.
- WEN Han-jie, LUO Chong-guang, DU Sheng-jiang, YU Wen-xiu, GU Han-nian, LIN Kun-yue, CUI Yan, LI Yang, YANG Ji-hua. 2020. Carbonate-hosted clay-type lithium deposit and its prospecting significance [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 65(01): 53-59(in Chinese with English abstract).
- WU Ming-qing, WEN Qi-zhong, PAN Jing-yu, DIAO Gui-yi. 1995. Average chemical composition of loess in China: as a good representative of the upper continental crust[J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 15(2): 127-136(in English with Chinese abstract).
- XIE Xue-jing. 1990. Some problems, strategical and tactical, in international geochemical mapping[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 39(1): 15-33.
- XUE Tian-xing, XIONG Xian-xiao, TIAN Sheng-ping. 2011. Discussion on the principal phosphorite-concentrated districts and the resource potential in China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 33(01): 9-20(in Chinese with English abstract).
- XIE Xue-jing, CHENG Hang-xin. 1997. The suitability of flood-plain sediment as a global sampling medium: evidence from China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 58: 51-62.
- XIE Yu-ling, LI Ying-xu, HOU Zeng-qian, COOK D R, DANYUSHEVSKY L, DOMINY S, YIN Shu-ping. 2015. A model for carbonatite hosted REE mineralisation — the Mianning-Dechang REE belt, Western Sichuan Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 70: 595-612.
- XU C, TAYLOR R N, LI W, KYNICKY J, CHAKHMOURADIAN A R, SONG W. 2012. Comparison of fluorite geochemistry from ree deposits in the Panxi region and Bayan Obo, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 57: 76-89.
- YUAN Zhong-xin, BAI Ge. 2001. Temporal and spatial distribution of endogenic rare and rare earth mineral deposits of China[J]. *Mineral Deposits*, (04): 347-354(in Chinese with English abstract).
- YUAN Zhong-xin, LI Jian-kang, WANG Deng-hong, ZHENG Guo-dong, LOU De-bo, CHEN Zheng-hui, ZHAO Zhi, YU Yang. 2012. Metallogenic regularity of REE ore deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 79-83(in Chinese).
- ZHANG Qin, BAI Jin-feng, WANG Ye. 2012. Analytical scheme and quality monitoring system for China geochemical baselines[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(03): 33-42(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Shang-qing, ZHANG Wen-xu, ZHONG Zhuang-hua, ZHAO Jun, SUN Kai, CAO Ya-qi. 2018. REE Geochemical Characteristics and Geological Significance of Bauxite from Xing County, Shanxi Province[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 36(03): 338-349(in Chinese with English abstract).
- ZHU Xiang-kun, SUN Jian. 2012. Ore-forming epoch and episodes of REE mineralization in the Bayan Obo ore deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(6): 845-856(in Chinese with English abstract).