

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.901



兴蒙—华北地球化学走廊带稀土元素含量与空间分布

唐坤^{1,2}, 王学求^{1,2*}, 迟清华¹, 周建¹, 刘东盛¹, 刘汉粮¹

1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 国土资源部地球化学探测技术重点实验室, 河北廊坊 065000

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要:为研究兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带区域地球化学组成及其横向空间变化, 统计分析不同地理单元和五万图幅单元的 REE 含量并绘制其空间分布折线图。内蒙古半干旱草原土壤中稀土含量较低, 与其草原沙土的粘土矿物较少有关; 江苏北部冲积平原区的土壤中稀土含量较高, 与降雨量存在良好空间对应关系。内蒙古红格尔到河北张家口, 土壤与岩石 Σ REE 的比值绝大多数小于 1, REE 发生贫化; 山东章丘到江苏连云港, 比值基本大于 1, REE 发生富集。华北克拉通内蒙地块土壤稀土特征与兴蒙造山带相似, 可能受其草原沙土景观的影响。在不同构造单元之间, LREE 与 HREE 亏损与富集的空间分布存在细微差异。结果表明, 地理景观, 特别是黏土矿物是影响土壤 REE 含量的重要因素, 降雨量与 REE 存在良好空间对应关系, REE 自身的地球化学性质的差异在土壤形成过程中对轻重稀土元素分异具有重要影响。

关键词: 稀土元素; 兴蒙造山带—华北克拉通; 地球化学走廊带; 土壤; 岩石; 空间分布; 地球化学。

中图分类号: P595; P596

文章编号: 1000-2383(2018)03-0655-17

收稿日期: 2017-12-22

Concentration and Spatial Distribution of REE in Geochemical Transect of Xingmeng Orogenic Belt-North China Craton

Tang Kun^{1,2}, Wang Xueqiu^{1,2*}, Chi Qinghua¹, Zhou Jian¹, Liu Dongsheng¹, Liu Hanliang¹

1. Key Laboratory of Geochemical Exploration, Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: In order to study the regional geochemical composition and lateral spatial variation of the geochemical belt in the North China Craton, rock and regolith samples along a transect across the Xingmeng Orogenic Belt-North China Craton were collected and 14 rare earth element (REE) concentrations were determined. Data of statistical analyses for regolith samples were based on tectonic units, geographical landscape, soil types and rainfall units, and for rock samples were based on tectonic units, rock types, and geologic age units. An average value was calculated from each 1:50 000 map sheet. The spatial distribution of REE concentrations is plotted in figures. The results show that: (1) REEs are depleted in Inner Mongolia semi-arid grassland soils due to less clay minerals in the soils, whereas REEs are enriched in the alluvial plain soils of the northern Jiangsu corresponding to the maximum rainfall zone. (2) In the transect from Honger to Zhangjiakou, REE ratio of soil to rock mostly is less than 1, indicating that the REE is leached in soils or diluted by windblown sand; in the transect from Zhangqiu to Lianyungang, the ratio is greater than 1, indicating that the soil REE are enriched in soils. (3) The REE characteristics of the Inner Mongolia block, which belong to the North China Craton, are more similar to those of the Xingmeng Orogenic Belt, affected by the semi-arid sandy soil of Inner Mongolia; The spatial distribution of LREE and HREE with depletion or enrichment in different tectonic

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项课题“地球化学走廊带探测实验与示范”(No.201011057); 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所基本科研业务费专项资金(No.AS2013J09)。

作者简介: 唐坤(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事应用地球化学研究。ORCID:0000-00002-7862-1339. E-mail: tangkun08@126.com

*** 通讯作者:** 王学求, ORCID:0000-00002-7239-7647. E-mail: wangxueqiu@igge.cn

引用格式: 唐坤, 王学求, 迟清华, 等. 2018. 兴蒙—华北地球化学走廊带稀土元素含量与空间分布. 地球科学, 43(3): 655-671.

units indicates that geochemical properties of REE affecting on the fractionation of REE in the process of soil formation.

Key words: rare earth element; Xingmeng Orogenic Belt-North China Craton; geochemical transect; regolith; rock; spatial distribution; geochemistry.

0 引言

稀土元素作为具有相似地球化学行为的一组元素,其独特的地球化学性质(如在表生条件下较为稳定、轻重稀土元素的分馏行为等)让其成为研究地球表层物质组成良好的天然对象。物质是运动的,运动具有时空特征,稀土元素作为表层地球物质的组成部分,其不同地质体中的分布、迁移必然也表现出时空特征。土壤是由各种岩石风化所形成的综合产物,可以代表各种岩石的平均值,因此具有良好的空间代表性,但缺乏时间代表性;与土壤相反,岩石具备不同的时代属性特征,但单一岩石样品缺乏良好的空间代表性。因此,利用稀土元素固有的地球化学性质,研究其在土壤中的含量与空间分布特征以及岩石中的含量时间分布特征,不仅从元素含量变化方面,更从元素的空间和时间分布方面,探讨在元素尺度上物质含量变化的时空特征,对加强地球化学元素的分布、迁移认识具有很好的研究意义。

在大陆地壳化学组成与元素丰度研究方面,高山(1999)指出:“大陆地壳化学成分及其时空变化是认识地壳形成、演化以及定量研究地球动力学过程的地球化学前提,并认为人们对大陆地壳成分仍缺乏深入的了解。由于缺少大面积区域岩石地球化学研究,现有大陆地壳成分模型基本未考虑地壳化学组成的横向区域性变化。”其中涉及地壳化学组成的横向区域性变化,正是地球化学走廊带研究项目可以进行探索涉及的内容。2008—2014年,在“深部探测计划”第四项目——“地壳全元素探测技术与实验示范(SinoProbe-04)”(王学求等,2010)中开展了地球化学走廊带探测实验与示范,通过系统采集不同地质单元、不同时代的代表性的岩石样品和地表疏松沉积物(土壤)样品,全面系统地精确测定土壤和岩石中天然元素的含量(张勤等,2012),从空间和时间尺度上认识中国大陆不同大地构造单元化学元素的分布和演化,建立地壳不同结构层地球化学模型,研究大规模成矿作用的物质背景。

对于元素在土壤和岩石中的分布,有学者(迟清华,2002,2004;迟清华和鄢明才,2006)在大量实测样品基础上,对元素 Au、Hg 和铂族元素进行了研究,并给出了这些元素在地壳、沉积物、岩石中的丰度,并最终系统收集了国内外地球化学元素在不同

介质中的数据,汇编形成了《应用地球化学元素丰度数据手册》一书(迟清华和鄢明才,2007)。但这些涉及元素在不同介质中的含量都只给出了数值高低,而没有涉及空间分布。对稀土元素在各类沉积物和岩石中的研究已十分广泛且深入,就沉积物而言涉及风尘沉积物(曹军骥等,2001;谢远云等,2013)、平原区沉积物(魏亮等,2010)、海洋沉积物(杨守业等,2003;刘建国等,2010;蓝先洪等,2016;任江波等,2016)、中国不同类型土壤的稀土元素特征及指示意义(杨恬等,2010;王立军等,1997)、沉积物物源示踪(杨守业和李从先,1999)和形成土壤过程中风化作用的稀土元素行为(马英军等,2004;付伟等,2014)等;就岩石而言涉及不同岩石类型的稀土元素地球化学特征(李定龙,2000;冯彩霞等,2010;熊国庆等,2010;杨兴莲等,2012)、矿床中矿石稀土元素特征及对成矿的意义(凌其聪和刘丛强,2001;李立兴等,2009)以及捕虏体的稀土元素地球化学特征(樊祺诚等,1998)。此外,还有关于地下水稀土元素特征(郭华明等,2010;谢先军等,2012)以及大量各类地质体有关同位素和年代学(侯红星等,2016;赵硕等,2016)等方面的研究。总之,稀土元素的研究一直是一个热点,前人主要涉及在沉积物不同介质、同一类沉积物(例如土壤)在全国空间尺度上稀土元素的分布及稀土元素的指示意义等方面,而缺少系统采集不同采样介质(土壤和岩石)的空间分布或沉积物与其空间相关岩石继承性方面的综合研究。

2008—2014年,中国开展的地球表层元素含量与空间分布的地球化学基准值研究工作,系统提出了全国基准值的采样方法(Wang *et al.*, 2015),建立中国表层地球化学元素含量与空间变化的标尺(王学求,2012),在获得元素含量的数值特征和空间特征的基础上,结合其他学科的研究成果,对于了解中国资源分布状况、环境变化、土地利用等方面具有重要意义(王学求等,2010),并对全国 Hg 元素含量与空间分布进行了研究(Wang, 2014)。国外地球化学走廊带的研究,主要是关于跨越美国和加拿大两个国家的北美大陆尺度地球化学走廊带的研究,Smith and Reimann(2008)认为低密度沉积物地球化学填图可以反映很多有用的信息,结果表明该北美地球化学走廊带土壤的Cr和Ca两种元素在采

样所穿过地区,其地球化学含量与空间变化特征与低密度地球化学土壤采样类似,整体而言能反映出区域地质背景对元素含量的影响,而 Hg 元素其含量除与地质背景相关外,还与降雨量的空间变化对应较好.Drew 研究的侧重点是不同层位土壤含量的对比,通过判别分析表明:对于采集的土壤样品,与其土壤矿物学特征相比,地球化学特征与一级地理景观分区空间对应更好(Drew *et al.*, 2010).但在中国,对于全国乃至全球尺度进行系统地采样研究地球化学元素的含量与空间分布,特别是国内地球化学走廊带方面的研究还是空白。

地球化学走廊带探测研究,是通过系统采集土壤以及与其对应的岩石样品,从长剖面这个新视角来刻画研究地球化学元素与所穿过区域的地质、地理、气候等因素的关系.本文选取兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带(以下简称本走廊带)作为研究对象,从稀土元素角度,探讨研究:(1)土壤中稀土

元素在不同构造单元、地理景观、土壤类型、降雨量等级下的特征;(2)选取本走廊带上广泛分布的花岗岩为样本,研究其稀土元素不同构造单元和不同时代岩石类型分布特征;(3)对比稀土元素在各个构造单元土壤和岩石中的含量与空间分布差异特征。

1 研究区背景

兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带,主要穿越了兴蒙造山带和华北克拉通以及南苏鲁造山带东段三大一级构造单元,研究区地质简图见图 1;各二级构造单元自西北向东南,依次穿越了兴蒙造山带的大兴安岭北段造山带、大兴安岭南段造山带、华北北缘造山带、内蒙古地块、燕山造山带、华北盆地、鲁西地块和秦岭—大别—苏鲁造山带的南苏鲁造山带,各二级构造单元主要岩性见表 1.地理景观主要为半干旱草原、山地丘陵区 and 冲积平原区,自内蒙古红格

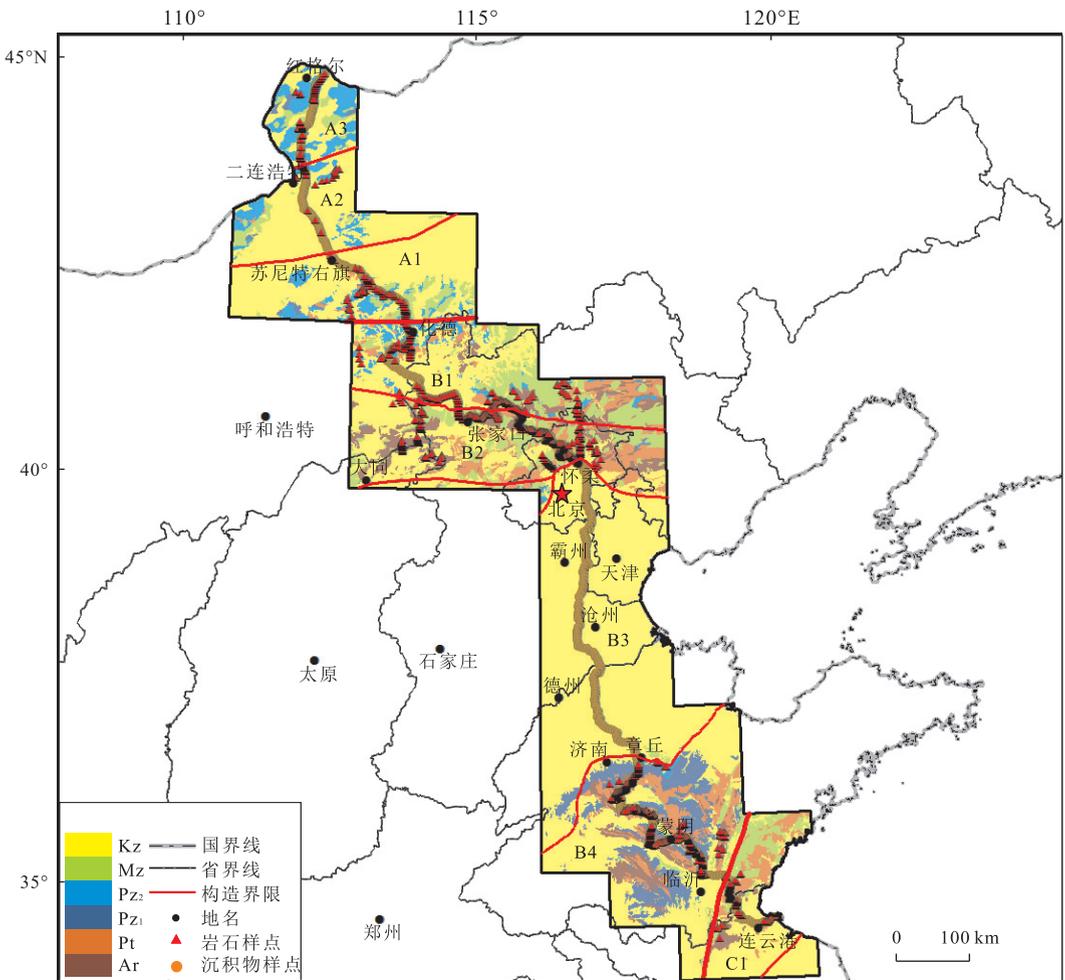


图 1 研究区及样点示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area and the samples location

表 1 兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带各二级构造单元主要岩性

Table 1 The main lithology in different secondary tectonic units on the geochemical transect of the Xingmeng Orogenic Belt—North China Craton

构造单元	主要岩性
A3	地层以泥盆系长石石英砂岩、硬砂岩和石炭系长石石英砂岩、流纹质砂砾岩、变泥岩等碎屑岩为主;岩浆岩主要为海西期碱长花岗岩、黑云二长花岗岩、安山岩以及燕山早期碱长花岗岩、流纹岩、安山岩。
A2	地层以新近系长石石英砂岩等碎屑岩为主,其次发育志留系一下泥盆统温都尔庙群石英片岩、变质长石硬砂岩以及石炭系碎屑岩和白垩系长石石英砂岩、粘土岩;岩浆岩有海西期黑云花岗岩闪长岩和燕山期碱长花岗岩。
A1	地层以温都尔庙群绢云石英片岩、绿泥片岩夹大理岩、磁铁石英岩,石炭系碎屑岩、碳酸盐岩,二叠系碎屑岩、粉砂质千枚岩以及新近纪碎屑岩等为主;岩浆岩以海西—印支期各类花岗岩及燕山中酸性岩浆岩。
B1	结晶基底由太古宇中基性麻粒岩、TTG 片麻岩、变粒岩等组成,地层为早古生界白云鄂博群砂质板岩、千枚岩、长石石英砂岩及新近系粘土和砂砾等组成沉积盖层;岩浆岩为古元古代片麻状花岗岩、斜长角闪岩,海西晚期—燕山期各类中酸性岩浆岩,新近纪汉诺坝组玄武岩等。
B2	结晶基底由太古宇基性—超基性麻粒岩、黑云斜长片麻岩、浅粒岩等组成,沉积盖层由中元古界青白口系、长城系、蓟县系碳酸盐岩和碎屑岩,寒武系碳酸盐岩、碎屑岩等组成,岩浆岩为古元古界片麻岩、二长花岗岩、斜长角闪岩、碱长浅粒岩,加里东期—燕山期各类中酸性岩浆岩。
B3	第四系冲积物、洪积物、海积物。
B4	结晶基底由太古宇基性—超基性麻粒岩、变粒岩、TTG 片麻岩以及科马提岩等组成,沉积盖层由新元古界震旦系碎屑岩,古生界的碳酸盐岩、碎屑岩组成,岩浆岩主要为古元古界碱长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩,加里东期金伯利岩、印支期—燕山期中酸性岩浆岩等,规模较小。
C1	地层为第四系冲积物、洪积物及白垩系碎屑岩,岩浆岩为太古宇斜长片麻岩、碱长浅粒岩,元古宇碱长片麻岩、片岩、浅粒岩、花岗闪长岩,印支期花岗岩闪长岩、闪长岩,燕山期碱长花岗岩、二长花岗岩等。

注: A3. 大兴安岭北段造山带; A2. 大兴安岭南段造山带; A1. 华北北缘造山带; B1. 内蒙地块; B2. 燕山造山带; B3. 华北盆地; B4. 鲁西地块; C1. 南鲁鲁造山带。

尔到河北张家口一带主要为半干旱草原地理景观,从河北张家口至北京怀柔,为燕山造山带控制形成的山地丘陵地貌,二者空间分布基本重合,从北京怀柔至山东章丘一带为冲积平原景观,亦为华北平原分布区,从山东章丘至山东江苏省界处为山地丘陵地理景观,而从江苏省界至江苏连云港海边为冲积平原地理景观,靠近海边为海积物分布区。土壤类型自内蒙古红格尔至内蒙古苏尼特右旗为灰钙土—棕钙土带,内蒙古苏尼特右旗至河北怀来县为黑钙土—栗钙土—黑垆土带,河北怀来县直至江苏连云港为棕壤—褐土带。降雨量等级,自西北的内蒙古到东南的江苏降雨量逐渐升高,分为 50~200 mm、200~400 mm、400~800 mm、800~1 600 mm 4 个等级,4 个降雨量等级的 3 个分界点分别在内蒙古苏尼特右旗、河北张北县、山东蒙阴县。

2 采样分析与数据处理

2.1 采样与分析

对于样品采集,主要依据景观地貌的变化和基岩出露情况,采集能代表各自样点一定区域内物质平均组成的土壤样品。在山地丘陵地貌和基岩出露较为复杂的地段,沿着走廊带平均每隔 1 km 距离采集 1 件岩石样品,平均约 2 km 采集 1 件土壤样

品;在景观地貌较为平坦和基岩出露较为简单的地段,约平均间隔 4 km 采集分别采集 1 件土壤和岩石样品;在冲积平原区由于走廊带线路所穿过路线没有可供采集的岩石样品时,故只有每 4 km 采集 1 件土壤样品。本文涉及到的兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带,主要有冲积平原区、山地丘陵区 and 半干旱草原 3 种地理景观。冲积平原区主体为华北平原,其次为江苏北部连云港地区的平原,在这些地区沿走廊带每隔 4 km 采集一个 25 cm 以下的平原区土壤样品;而山地丘陵区大致位于北京怀柔至河北张家口一带和鲁西地区,在这些地区的地表出露基岩复杂地段,每隔约 1 km 和 2 km 分别采集 1 件岩石样品和水系沉积物样品,在基岩出露相对较为简单的地段,每隔约 4 km 分别采集 1 件岩石和水系沉积物样品;内蒙古半干旱草原特殊地理景观区,大致分布于张家口以北至二连浩特红格尔地区,每隔约 4 km 采集 1 件草原沙土样品,但在有基岩出露地段采样间距加密为 2 km 同时采集 1 件岩石和草原沙土样品。兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带样点示意图如图 1 所示。

本走廊带上采集的土壤和岩石样品采用多种分析技术配套的方案分析了 76 种元素,这种配套分析技术可以最大程度地发挥各种分析仪器的优势,得到高准确度和精确度的分析数据,其中,本文涉及到

的稀土元素采用了等离子质谱法分析(ICP-MS);同时,在分析过程中除了加入重复样外,还通过加入标准样来监控分析质量.对于重复样,按样品总数 10% 的比例抽取实验室内部密码重复样品,以密码方式进行预先分析,以控制日常分析中的批次偏差.计算基本分析值与重复性分析值的相对偏差 RD 的合格率应不小于 90%.在每一批样本(50 个号码)以密码方式插入 2 个岩石和 2 个水系沉积物国家一级标准物质,同样品一起分析后,计算单个标准物质测定值与标准值的对数差($\Delta \lg C$)以监控分析过程的准确度,计算对数差的标准偏差(λ)监控分析批次内的精密性,合格率应达到 100%.对样品的详细分析方法与技术方案见《地壳全元素配套分析方案及分析质量监控系统》一文(张勤等,2012).

2.2 数据处理

在地球化学填图中,采样设计和数据成图通常采用网格化处理方法.借鉴这一思路,结合兴蒙造山带—华北克拉通走廊带的实际情况,本文采取 1:50 000 地图分幅范围对样点进行网格化(共 88 格).对于土壤样品,分别求得各自网格内所有土壤样品稀土元素含量的中位数,代表格网内的平均物质组成,绘制出兴蒙造山带—华北克拉通走廊带地球化学的含量折线图,展示这些指标在走廊带上的空间分布特征,进而研究稀土元素含量与二级构造单元、地理景观、土壤类型、降雨量等之间的空间关系;特别地,对于岩石样品,鉴于受基岩出露情况复杂多变,甚至某些地段没有出露而无法采集到岩石样品,因此样品的间距变化大(1~4 km)而导致的某些格子里样品数量不足,无法满足求取统计学上中位数计算所要求的数量原则,故采用平均值方式求取各自单元格子内的岩石中的稀土元素含量.球粒陨石标准化采用 Boynton 发表于 1984 年的数据(内部文献,未公开).

3 土壤与岩石的含量特征

3.1 土壤稀土元素含量特征

由于稀土元素类似的地球化学性质,兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带上土壤的稀土元素含量表现出类似的规律,现以 La 为例说明稀土元素的含量在各单元的分布特征.由表 2 可知,从构造单元看,La 在兴蒙造山带各二级构造单元(A3、A2、A1)和华北克拉通的 B1 二级构造单元表现为较低含量(19.42~23.34 $\mu\text{g/g}$),而华北克拉通(B2、B3、B4)表现为中等含量(34.37~35.95 $\mu\text{g/g}$),南苏鲁

造山带最高(42.20 $\mu\text{g/g}$);从地理景观看,La 在半干旱草原区含量最低(20.70 $\mu\text{g/g}$),其次为山地丘陵区(34.43 $\mu\text{g/g}$),在冲积平原区含量最高(36.03 $\mu\text{g/g}$);从土壤类型看,La 在灰钙土—棕钙土带和黑钙土—栗钙土—黑垆土带(a、b)中含量均较低(分别为 20.44 $\mu\text{g/g}$ 和 25.12 $\mu\text{g/g}$),而在棕壤—褐土带(c)中含量相对较高(35.12 $\mu\text{g/g}$);从降雨量看,从西北的内蒙古红格尔到东南的江苏连云港,随着降雨量增高(从 50 mm 到 1 600 mm),La 在土壤中的含量也逐渐增高(从 20.60 $\mu\text{g/g}$ 到 39.26 $\mu\text{g/g}$),并且在降雨量从 400 mm 增加到 800 mm 时,La 的含量增加特别明显,从 21.85 $\mu\text{g/g}$ 增加到 33.94 $\mu\text{g/g}$,显示了降雨量与稀土元素含量具有较好的空间对应关系.

3.2 花岗岩类稀土元素含量特征

岩浆岩充分体现了岩石种类复杂多样的特性,且岩浆结晶形成岩浆岩是地球上 3 大岩石相互演变循环的起点,从结晶分异演化角度看,花岗岩结晶演化程度最高,是岩浆演化分异最晚期和成熟的产物,作为不相容元素的稀土元素也倾向于向花岗岩类富集.而在兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带上,花岗岩在空间上分布较为广泛,在各个地质时代也各有分布.因此选取岩浆岩中的花岗岩作为对象研究稀土元素的含量和时空分布特征.

花岗岩样品在各单元分布见表 3.从地质时代分布上看,花岗岩样品以中生代(M₂)为主,所占比例达 50.2%,其次为古元古代(Pt₁)的 19.5%和晚古生代(P_{z2})的 15.0%,而新太古代(Ar₃)占 8.6%和新元古代(Pt₃)占 6.1%的比例较小,这与研究范围内酸性岩浆岩活动出现在中生代燕山期和古元古代,其次为晚古生代的海西晚期,相对而言晚太古和新元古代酸性岩浆岩活动较弱的地质背景相符合,见图 1.从构造单元空间分布看,花岗岩样品主要集中华北克拉通的燕山造山带(B2, 30.8%)和鲁西地块(B4, 30.0%),二者合计达 60.8%;其次为兴蒙造山带的华北北缘造山带(A1, 15.4%)和大兴安岭北段造山带(A3, 9.6%),而南苏鲁造山带(C1)占到 12.1%,最少为第三纪大面积分布的大兴安岭南段造山带(A2, 2.1%).

从表 3 可知,从岩石样品数量上看,花岗岩以二长花岗岩和碱长花岗岩为主.从表 4 中可知,各类花岗岩的稀土含量均表现出差异性,以稀土元素 La 为例,其在不同花岗岩中为 34.39~71.89 $\mu\text{g/g}$,花岗斑岩最高(71.89 $\mu\text{g/g}$),碱长花岗岩最低

表 2 兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带土壤稀土元素含量

Table 2 The content of REE in regoliths on the geochemical transect of the Xingmeng Orogenic Belt-North China Craton

单元	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
走廊带	31.90	63.20	7.45	27.65	5.13	1.09	4.37	0.70	4.07	0.79	2.28	0.37	2.36	0.38	
构造单元	A3	21.00	40.57	5.07	18.78	3.54	0.78	3.15	0.50	2.97	0.60	1.82	0.30	2.03	0.35
	A2	19.42	37.39	4.65	17.02	3.08	0.73	2.77	0.42	2.52	0.49	1.48	0.24	1.57	0.25
	A1	19.77	38.50	4.73	16.81	3.10	0.76	2.92	0.44	2.67	0.53	1.51	0.25	1.63	0.27
	B1	23.34	46.07	5.46	20.11	3.65	0.87	3.27	0.49	3.00	0.57	1.67	0.28	1.83	0.29
地理景观	B2	35.95	71.10	8.40	30.79	5.59	1.23	4.84	0.76	4.33	0.84	2.41	0.39	2.44	0.39
	B3	34.37	65.71	7.82	29.32	5.57	1.14	4.75	0.78	4.52	0.88	2.51	0.41	2.62	0.43
	B4	34.77	70.39	8.00	29.72	5.44	1.19	4.54	0.72	4.19	0.80	2.21	0.37	2.35	0.38
	C1	42.20	90.88	9.82	36.28	6.59	1.35	5.27	0.88	4.86	0.95	2.78	0.46	2.92	0.48
土壤类型	(1)	20.70	40.49	5.00	18.48	3.36	0.81	2.99	0.47	2.76	0.54	1.59	0.27	1.70	0.28
	(2)	34.43	66.88	7.82	29.35	5.58	1.15	4.75	0.78	4.51	0.88	2.53	0.41	2.65	0.44
	(3)	36.03	71.72	8.37	30.77	5.63	1.22	4.75	0.75	4.34	0.84	2.40	0.38	2.46	0.39
降雨量	a	20.44	39.39	4.95	18.13	3.30	0.75	2.94	0.46	2.71	0.53	1.58	0.27	1.71	0.29
	b	25.12	50.72	6.00	22.34	4.09	0.91	3.65	0.55	3.36	0.64	1.84	0.31	1.93	0.30
	c	35.12	69.47	8.16	29.89	5.67	1.19	4.80	0.77	4.46	0.86	2.48	0.40	2.56	0.42
	①	20.60	40.37	4.99	18.46	3.30	0.78	2.98	0.46	2.71	0.53	1.60	0.27	1.73	0.30
土壤类型	②	21.85	42.78	5.11	19.00	3.54	0.82	3.10	0.48	2.98	0.57	1.67	0.28	1.83	0.29
	③	33.94	66.55	7.83	29.15	5.44	1.15	4.66	0.75	4.35	0.84	2.43	0.39	2.48	0.41
	④	39.24	82.06	9.15	32.90	6.00	1.29	5.08	0.79	4.58	0.90	2.59	0.42	2.76	0.44

注:各元素单位为 $\mu\text{g/g}$; A3. 大兴安岭北段造山带; A2. 大兴安岭南段造山带; A1. 华北北缘造山带; B1. 内蒙地块; B2. 燕山造山带; B3. 华北盆地; B4. 鲁西地块; C1. 苏鲁造山带; 地理景观: (1) 半干旱草原; (2) 低山丘陵; (3) 冲积平原; 土壤类型: a. 灰钙土—棕钙土带; b. 黑钙土—栗钙土—黑垆土带; c. 棕壤—褐土带; 降雨量: ① 50~200 mm; ② 200~400 mm; ③ 400~800 mm; ④ 800~1 600 mm.

表 3 兴蒙造山带—华北克拉通花岗岩样品数量分类统计

Table 3 The number of samples of granitoids on the geochemical transect of the Xingmeng Orogenic Belt-North China Craton

构造单元	样数	百分比	岩石类型	样数	百分比	地质时代	样数	百分比
A3	31	9.6%	碱长花岗岩	80	40.8%	Mz	157	50.2%
A2	5	2.1%	二长花岗岩	111	46.3%	Pz ₂	47	15.0%
A1	39	15.4%	斜长花岗岩	3	1.3%	Pt ₃	19	6.1%
B2	136	30.8%	花岗闪长岩	27	11.3%	Pt ₁	61	19.5%
B4	73	30.0%	花岗斑岩	1	0.4%	Ar ₃	27	8.6%
C1	29	12.1%						

注: A3. 大兴安岭北段造山带; A2. 大兴安岭南段造山带; A1. 华北北缘造山带; B2. 燕山造山带; B4. 鲁西地块; C1. 南苏鲁造山带.

(34.39 $\mu\text{g/g}$), 二长花岗岩(44.74 $\mu\text{g/g}$)与花岗闪长岩(40.00 $\mu\text{g/g}$)相差不大.按稀土元素二分法划分,轻稀土元素(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu),除 Sm 外的其他轻稀土元素含量均在碱长花岗岩中最低,除 Eu 外的其他轻稀土元素均在花岗斑岩中最高;而重稀土元素(Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu)均表现为含量在斜长花岗岩中最低,而在花岗斑岩中最高.此外,元素 Eu 表现为花岗斑岩<碱长花岗岩<二长花岗岩<斜长花岗岩<花岗闪长岩的趋势,说明稀土元素 Eu 与其他稀土元素不同的地球化学特征.

从表 4 中可知,以 La 为例,各二级构造单元在花岗岩中含量为 13.72~51.63 $\mu\text{g/g}$,燕山造山带(B2)最高,大兴安岭南段造山带(A2)最低;按稀土

元素二分法划分看,轻稀土元素(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu),除 Ce 和 Eu 外的其他轻稀土元素均在燕山造山带(B2)中含量最高,而 Ce 和 Eu 均在南苏鲁造山带(C1)中含量最高;除 Sm 外的其他稀土元素,均在大兴安岭南段造山带(A2)含量最低,而 Sm 含量在鲁西地块(B4)含量最低.花岗岩中的重稀土元素(Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu)含量均表现为在大兴安岭北段造山带(A1)最高,而在鲁西地块(B4)最低.

从表 4 可知,以 La 为例,各地质时代之间的含量在 24.97~54.76 $\mu\text{g/g}$,最高在古元古代(Pt₁),最低在晚古生代(Pz₂);轻稀土元素(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu),除 Ce 和 Eu 外的其他轻稀土元素均在早

表 4 兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带花岗岩类稀土元素含量

Table 4 The content of REE in granitoids on the geochemical transect of the Xingmeng Orogenic Belt-North China Craton

元素	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
二长花岗岩	44.74	78.94	9.54	32.18	5.00	0.88	3.62	0.53	2.84	0.52	1.57	0.25	1.70	0.25
花岗斑岩	71.89	117.59	13.83	48.74	8.35	0.62	7.28	1.15	6.05	1.11	3.11	0.50	3.32	0.49
花岗闪长岩	40.62	81.14	9.50	34.29	5.66	1.45	4.48	0.64	3.43	0.62	1.83	0.28	1.83	0.27
碱长花岗岩	38.07	69.54	8.46	29.84	5.25	0.63	4.40	0.75	4.36	0.86	2.69	0.46	3.17	0.47
斜长花岗岩	56.39	94.14	10.08	33.10	4.32	0.97	2.47	0.29	1.35	0.22	0.68	0.10	0.66	0.10
A3	27.59	63.48	7.61	29.19	6.45	0.51	6.25	1.23	7.57	1.55	4.98	0.89	6.13	0.93
A2	13.72	33.74	3.95	15.42	4.11	0.29	4.96	1.08	7.16	1.53	4.95	0.88	6.09	0.91
A1	31.38	54.48	6.69	22.80	4.03	0.58	3.48	0.59	3.41	0.67	2.09	0.36	2.55	0.38
B2	51.63	91.94	11.76	40.97	6.28	1.06	4.65	0.65	3.50	0.64	1.89	0.30	1.98	0.28
B4	40.05	69.57	7.85	25.85	3.92	0.74	2.61	0.37	1.87	0.33	0.97	0.15	1.00	0.15
C1	50.58	93.48	10.72	37.39	6.15	1.23	4.80	0.74	3.99	0.74	2.26	0.37	2.43	0.37
Mz	40.38	77.63	9.05	31.27	5.09	0.88	3.98	0.61	3.40	0.64	1.96	0.33	2.23	0.33
Pz ₂	24.97	51.49	5.95	21.50	4.44	0.53	4.16	0.80	4.87	0.99	3.15	0.55	3.78	0.57
Pt ₃	50.82	92.16	10.60	36.74	6.19	1.12	4.90	0.79	4.30	0.81	2.46	0.41	2.72	0.41
Pt ₁	54.76	89.85	11.93	41.29	6.33	0.97	4.57	0.64	3.35	0.61	1.80	0.29	1.88	0.28
Ar ₃	40.06	67.62	7.44	24.17	3.47	0.77	2.21	0.30	1.47	0.25	0.75	0.12	0.74	0.11

注:各元素单位为 $\mu\text{g/g}$; A3.大兴安岭北段造山带; A2.大兴安岭南段造山带; A1.华北北缘造山带; B2.燕山造山带; B4.鲁西地块; C1.南苏鲁造山带。

元古代(Pt_1)含量最高,而 Ce 和 Eu 则在新元古代(Pt_3)最高;轻稀土元素除 Sm 外,均在晚古生代(Pz_2)中含量最低,而 Sm 则表现为在新太古代(Ar_3)含量最低,花岗岩中的重稀土元素(Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu)的含量,均在晚古生代(Pz_2)中最高(除 Gd 外),而 Gd 则在新元古代(Pt_3)中含量最高;而花岗岩重稀土元素的最低含量均在新太古代(Ar_3)。

综上所述,以 La 为例,其不同花岗岩岩性含量在 $34.39\sim 71.89 \mu\text{g/g}$,差值为 $37.50 \mu\text{g/g}$;不同构造单元含量在 $13.72\sim 51.63 \mu\text{g/g}$,差值为 $37.91 \mu\text{g/g}$,不同地质年代含量在 $24.97\sim 54.76 \mu\text{g/g}$,差值为 $29.79 \mu\text{g/g}$,含量变化在不同岩性和构造单元相较地质时代这个因素差异要大;花岗岩轻稀土元素与重稀土元素,因各自地球化学性质的微小差异,含量也表现出在不同岩性、构造单元、地质时代之间的差异。

4 分析与讨论

4.1 土壤稀土参数特征与配分模式

从稀土元素总量(以下分别用 $\sum \text{REE}$ 、 $\sum \text{LREE}$ 、 $\sum \text{HREE}$ 代表稀土总量、轻稀土总量、重稀土总量)看,各单元的含量变化特征与单个稀土元素十分相似,而整个兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带上土壤 $\sum \text{REE}$ 平均值为 $153.08 \mu\text{g/g}$,低于中国大陆土壤 $\sum \text{REE}$ 的 $172.11 \mu\text{g/g}$ (赵一阳

和鄢明才,1993)和北美页岩(NASC)平均 $\sum \text{REE}$ 的 $173.20 \mu\text{g/g}$,也低于黄土 $\sum \text{REE}$ 的 $167.95 \mu\text{g/g}$ (地球化学标准参考样为研究组黄土标准样 GSS-8,1987)并略大于上陆壳(UCC) $\sum \text{REE}$ 的 $146.40 \mu\text{g/g}$,整个走廊带的 $\sum \text{LREE}$ 为 $136.59 \mu\text{g/g}$, $\sum \text{HREE}$ 为 $15.37 \mu\text{g/g}$, $\sum \text{LREE}/\sum \text{HREE}$ 为 8.62, δEu 为 0.72, δCe 为 0.98, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 8.86, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 3.93, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 1.48。

各二级构造单元 $\sum \text{REE}$ 在 $91.11\sim 209.98 \mu\text{g/g}$, $\sum \text{LREE}$ 含量在 $82.04\sim 190.16 \mu\text{g/g}$, HREE 含量在 $9.79\sim 18.76 \mu\text{g/g}$;兴蒙造山带 $\sum \text{REE}$ ($91.11\sim 101.81 \mu\text{g/g}$),远低于中国大陆沉积物 $\sum \text{REE}$ 的 $172.11 \mu\text{g/g}$ 和北美页岩(NASC)的 $173.20 \mu\text{g/g}$,表现为明显的贫化特征;而在华北克拉通的 4 个二级构造单元, $\sum \text{REE}$ 、 $\sum \text{LREE}$ 大小顺序为 $\text{B1} < \text{B3} < \text{B4} < \text{B2}$,而 HREE 大小顺序为 $\text{B1} < \text{B4} < \text{B2} < \text{B3}$,即在 B1(内蒙地块)二级构造单元 $\sum \text{REE}$ 、 $\sum \text{LREE}$ 、 $\sum \text{HREE}$ 均最低,而 B2(燕山造山带)的 $\sum \text{REE}$ 、 $\sum \text{LREE}$ 含量最高,而 B3(华北盆地)的 $\sum \text{HREE}$ 含量最高,就 $\sum \text{REE}$ 最高的 B2($170.60 \mu\text{g/g}$)来看,华北克拉通土壤 $\sum \text{REE}$ 略低于中国大陆沉积物的 $172.11 \mu\text{g/g}$ 和北美页岩(NASC)的 $173.20 \mu\text{g/g}$,表现为略微贫化的特征。而 C1(南苏鲁造山带)的 $\sum \text{REE}$ 、 $\sum \text{LREE}$ 、 $\sum \text{HREE}$ 均在整个走廊带上最高,且就土壤 $\sum \text{REE}$ ($209.98 \mu\text{g/g}$)来看,远大于中国大陆沉积物 $\sum \text{REE}$ 的 $172.11 \mu\text{g/g}$ 和北美页岩

(NASC) 的 $173.20 \mu\text{g/g}$, 表明南苏鲁造山带沉积 ΣREE 发生了一定程度富集。

按地理景观的划分, 以中国大陆沉积物稀土元素的 $172.11 \mu\text{g/g}$ 和北美页岩 (NASC) 的 $173.20 \mu\text{g/g}$ 为标准: 半干旱草原 ΣREE 为 $99.85 \mu\text{g/g}$, 表现为明显贫化; 而冲积平原 ΣREE 为 $161.68 \mu\text{g/g}$ 和山地丘陵 ΣREE 为 $169.32 \mu\text{g/g}$, 表现为略微贫化特征。而就 ΣLREE 而言, 山地丘陵 ($152.95 \mu\text{g/g}$) 大于冲积平原 ($144.21 \mu\text{g/g}$) 景观区, 而 ΣHREE 则相反表现为冲积平原 ($16.88 \mu\text{g/g}$) 略大于山地丘陵 ($16.35 \mu\text{g/g}$), 而半干旱草原地理景观区, ΣLREE 、 ΣHREE 含量均最低, 表现为明显贫化。

对于土壤类型, 以中国大陆沉积物稀土元素的 $172.11 \mu\text{g/g}$ 和北美页岩 (NASC) 的 $173.20 \mu\text{g/g}$ 为标准: 灰钙土—棕钙土带 ($97.44 \mu\text{g/g}$) 和黑钙土—栗钙土—黑垆土带 ($124.15 \mu\text{g/g}$) 的稀土总量 ΣREE 为表现为贫化特征, 其中灰钙土—棕钙土带明显贫化, 而棕壤—褐土带 ($166.21 \mu\text{g/g}$) 的稀土总量 ΣREE 表现为略微贫化的特征; 而 LREE、HREE 含量变化也与稀土总量 ΣREE 具有类似规律特点, 与构造单元和地理景观不同, 土壤类型表现出 ΣREE 、 ΣLREE 、 ΣHREE 3 个指标含量变化相对一致的特征。

对于降雨量而言, 以 ΣREE 在中国大陆沉积物的 $172.11 \mu\text{g/g}$ 和北美页岩 (NASC) 的 $173.20 \mu\text{g/g}$ 为标准: 在 $50 \sim 200 \text{ mm}$ 和 $200 \sim 400 \text{ mm}$ 区间, ΣREE 分别为 $99.12 \mu\text{g/g}$ 和 $102.70 \mu\text{g/g}$, 表现为明显的贫化特征, 在 $400 \sim 800 \text{ mm}$ 区间 ΣREE 分别为 $160.46 \mu\text{g/g}$, 表现为轻微贫化的特征, 在 $800 \sim 1600 \text{ mm}$ 区间 ΣREE 分别为 $190.57 \mu\text{g/g}$, 表现为较明显的富集特征; 与土壤类型类似, 降雨量也表现出 ΣREE 、 ΣLREE 、 ΣHREE 3 个指标含量变化相对一致的特征。此外, 由以上可知 ΣREE 在 400 mm 这个分界值前后从 $102.70 \mu\text{g/g}$ 增加到 $160.46 \mu\text{g/g}$, ΣLREE 从 $91.17 \mu\text{g/g}$ 增加到 $143.75 \mu\text{g/g}$, ΣHREE 从 $11.00 \mu\text{g/g}$ 增加到 $16.37 \mu\text{g/g}$, 说明 400 mm 可以作为兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带上土壤稀土元素含量的降雨量重要分界阈值。

影响土壤元素含量的因素很多, 特别是元素的表生地球化学性质越活泼, 在地表不同地理环境条件差异条件影响下, 元素的含量变化越大, 但对于表生地球化学性质较为稳定的稀土元素而言, 在地表土壤的含量变化应该不大。但从图 3 中 ΣREE 分布看, 在土

壤中稀土元素含量的空间差异明显, 这种含量的空间差异应该与每个地区的土壤来源密切相关, 并与地理景观有较好的对应关系: 在内蒙古半干旱草原, 稀土总量整体较低, 与张家口以南的山地丘陵地理景观区稀土总量的差异明显呈现“台阶”状, 而再往南的华北盆地与燕山地区的山地丘陵的稀土总量差异就相对较小。此外, 整体而言稀土元素总量随降雨量从西北内蒙古红格尔至江苏连云港增高而增高, 而与土壤类型和构造单元的直接对应关系不明晰。

由于 REE 自身各元素间的差异, 在成土过程中 REE 受到温度、pH 值、湿度、土壤盐分等环境因素影响, 同时与土壤中的次生矿物、微生物和植物发生各种物理、化学、生物化学作用而导致其相对丰度发生改变, 产生了 REE 的分馏 (陈莹等, 1999)。在稀土元素三分法中, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 可以分别看作是轻重稀土分馏程度、轻中稀土分馏程度和中重稀土分馏程度。

由表 5 可知, 反映土壤轻、重稀土元素分馏特征的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值在整个走廊带上值为 8.86, 轻稀土元素明显富集, 这与 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 反映的特征相一致。各二级构造单元土壤的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值在 7.13~10.05 之间, 整体而言, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值在兴蒙造山带 (7.13~8.62) 比华北克拉通 (8.82~10.05) 要低。这表明华北克拉通土壤的轻、重稀土元素的分馏程度较兴蒙造山带要大。此外, 在地理景观、土壤类型和降雨量等分类单元中存在自西北向东南较为明显的逐渐增高的空间分布特征。

反映轻稀土元素分馏程度的 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值在整个走廊带上为 3.93, 各二级构造单元在 3.75~4.09, 各单元差异不如 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值大, 且同样存在自西北向东南整体增加的趋势。这说明轻稀土元素在走廊带上的土壤中的分馏程度相对轻、重稀土元素之间的分馏要较弱, 且在不同分类单元之间差异不明显, 整体上存在自西北向东南微小而稳定增高的空间分布特征。

而反映重稀土元素分馏特征的 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值在整个走廊带上为 1.48, 各二级构造单元在 1.28~1.58, 在各构造单元、地理景观、土壤类型、降雨量之间差异也较小, 自西北向东南整体逐渐增高。这说明重稀土元素在走廊带上的土壤中分馏程度最低, 且差异在不同分类单元之间较小, 整体上存在自西北向东南微小而稳定增高的空间分布特征。

Eu 和 Ce 异常是研究沉积区的氧化—还原条件变化和源区风化程度变迁的重要指标 (朱赖民等,

表 5 兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带土壤稀土元素参数

Table 5 The REE parameters of regoliths on the geochemical transect of the Xingmeng Orogenic Belt-North China Craton

参数	∑REE	∑LREE	∑HREE	∑LREE/∑HREE	δEu	δCe	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N
走廊带	153.08	136.59	15.37	8.62	0.72	0.98	8.86	3.93	1.48
A3	101.81	89.46	11.78	7.66	0.68	0.95	7.13	3.75	1.29
A2	91.11	82.04	9.79	8.67	0.81	0.95	8.62	4.03	1.45
A1	94.98	84.17	10.19	7.96	0.77	0.96	7.88	3.93	1.37
B1	110.31	99.41	11.38	8.62	0.76	0.98	8.82	3.87	1.51
B2	170.60	154.81	16.61	9.67	0.73	1.00	10.05	3.94	1.58
B3	160.46	143.64	16.84	8.47	0.69	0.97	8.80	3.89	1.46
B4	165.22	149.75	15.43	9.28	0.71	1.01	9.66	4.02	1.52
C1	209.98	190.16	18.76	9.83	0.67	1.08	9.26	4.09	1.50
(1)	99.85	89.37	10.61	8.25	0.77	0.96	8.18	3.88	1.41
(2)	161.68	144.21	16.88	8.49	0.68	0.97	8.78	3.89	1.46
(3)	169.32	152.95	16.35	9.48	0.72	1.00	9.88	3.98	1.55
a	97.44	86.93	10.55	8.06	0.77	0.95	7.86	3.89	1.35
b	124.15	109.27	12.51	8.54	0.76	0.98	8.66	3.88	1.48
c	166.21	149.45	16.73	8.83	0.69	0.98	9.06	3.95	1.49
①	99.12	88.32	11.73	8.01	0.76	0.95	7.94	3.87	1.36
②	102.70	91.17	11.00	8.12	0.75	0.97	7.99	3.93	1.38
③	160.46	143.75	16.37	8.55	0.70	0.98	9.02	3.91	1.50
④	190.57	171.47	17.35	9.72	0.70	1.04	9.66	4.08	1.54

注: ∑REE、∑LREE、∑HREE 单位为 μg/g; A3. 大兴安岭北段造山带; A2. 大兴安岭南段造山带; A1. 华北北缘造山带; B1. 内蒙地块; B2. 燕山造山带; B3. 华北盆地; B4. 鲁西地块; C1. 南苏鲁造山带; 地理景观: (1) 半干旱草原; (2) 冲积平原; (3) 低山丘陵; 土壤类型: a. 灰钙土—棕钙土带; b. 黑钙土—栗钙土—黑垆土带; c. 棕壤—褐土带; 降雨量: ① 50~200 mm; ② 200~400 mm; ③ 400~800 mm; ④ 800~1 600 mm.

2006). 由表 5 可知, 整个走廊带 δEu 和 δCe 分别为 0.72 和 0.98, 各二级构造单元 δEu 在 0.67~0.81, δCe 在 0.95~1.08, 表现为较明显的 Eu 负异常, 无明显 Ce 异常, 但其从西北兴蒙造山带到华北克拉通, 再到南苏鲁造山带 δCe 存在明显而微小的稳定升高趋势. 这反映了走廊带上土壤中稀土元素 Eu 存在中等强度的亏损, 而 Ce 则相对较为稳定, 但由西北端的内蒙古红格尔至东南端的江苏连云港降雨量和年均气温稳定而显著增加, 表明 δCe 与降雨量和气温存在某种程度上的关系.

由图 2 可知, 走廊带整体及各二级构造单元土壤的稀土配分曲线十分相似, 均表现出右倾的富集轻稀土元素的模式, 均存在较明显的负 Eu 异常, 走廊带整体稀土配分模式与华北克拉通更接近, 曲线明显分为两组: 燕山造山带(B2)、华北盆地(B3)、鲁西地块(B4)、南苏鲁造山带(C1)整体含量较高的为一组; 大兴安岭北段造山带(A3)、大兴安岭南段造山带(A2)、华北北缘造山带(A1)、内蒙地块(B1)整体含量较低的为另一组. 南苏鲁造山带(C1)还存在相对微弱的 Ce 正异常, 而大兴安岭北段造山带(A3)在重稀土元素一端曲线出现略微“上翘”, 说明其相对其他二级构造单元而言具有相对轻微富集重稀土的特征. 由表 5 可知, 整个走廊带 ∑LREE/

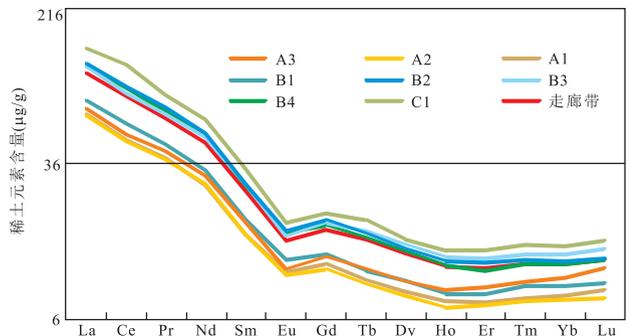


图 2 兴蒙造山带—华北克拉通各二级构造单元土壤稀土元素配分模式

Fig.2 The REE distribution patterns of regoliths in different secondary tectonic units on the geochemical transect of the Xingmeng Orogenic Belt-North China Craton

A3. 大兴安岭北段造山带; A2. 大兴安岭南段造山带; A1. 华北北缘造山带; B1. 内蒙地块; B2. 燕山造山带; B3. 华北盆地; B4. 鲁西地块; C1. 南苏鲁造山带

∑HREE 是 8.62, 各二级构造单元 ∑LREE/∑HREE 在 7.66~9.83, 说明兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带土壤各二级构造单元土壤轻稀土元素富集程度较高.

综上所述: 土壤中轻—重稀土分馏程度最明显,

其次是轻一中稀土的分馏,而中一重稀土分馏程度最低;轻一重稀土分馏程度最大的是燕山造山带(B2,10.05),最小的是大兴安岭北段造山带(A3,7.13);轻一中稀土分馏程度最大的是南苏鲁造山带(C1,4.09),最小的是大兴安岭北段造山带(A3,3.75);中一重稀土分馏程度最大的是燕山造山带(B2,1.58),最小的是大兴安岭北段造山带(A3,1.28); δEu 最小值在南苏鲁造山带(C1,0.67),而最大值在燕山造山带(A2,0.81),在这两个二级构造单元均表现出一定程度的Eu负异常; δCe 最小值在大兴安岭北段造山带(A3,0.95),表现为微弱的负Ce异常,而最大值在南苏鲁造山带(C1,1.08),表现为微弱的正Ce异常。土壤稀土元素配分模式,除与构造单元相关外,地理景观对其有一定影响,例如:属于不同构造单元的南苏鲁造山带土壤的稀土配分曲线与鲁西地块相似,则与该单元内土壤来源于鲁西地块及降雨量有一定关系;而内蒙地块虽属于华北克拉通,但其土壤稀土配分模式曲线与其地理景观保持一致的兴蒙造山带更相似,应与内蒙古半干旱草原广泛分布的草原沙土有关。

4.2 土壤与岩石含量与空间对比

由表 6 可知,整个走廊带岩石 ΣREE 、

ΣLREE 、 ΣHREE 分别为 $140.74\ \mu\text{g/g}$ 、 $126.93\ \mu\text{g/g}$ 、 $12.53\ \mu\text{g/g}$,均低于土壤的 $153.08\ \mu\text{g/g}$ 、 $136.59\ \mu\text{g/g}$ 、 $15.37\ \mu\text{g/g}$,这表明整个走廊带土壤轻稀土、重稀土元素均较岩石有所富集;而从 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值看,岩石为 9.49,大于土壤的 8.62,因此就整体而言,本走廊带上岩石中轻稀土较重稀土在土壤中所占比例要高,即相对而言:本走廊带上土壤中轻稀土元素相对重稀土元素,在表生条件发生了贫化。

从构造单元看,走廊带上兴蒙造山带的 3 个二级构造单元大兴安岭北段造山带(A3)、大兴安岭南段造山带(A2)、华北北缘造山带(A1)均呈现出 ΣREE 、 ΣLREE 、 ΣHREE 在岩石中的含量高于土壤,而从 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值看,则体现出岩石低于土壤,这表明就稀土元素含量而言,兴蒙造山带土壤相对于其各自构造单元发生了一定程度的贫化,但轻稀土所占总稀土比例却相对升高;而兴蒙造山带的三个二级构造单元内蒙地块(B1)、燕山造山带(B2)、鲁西地块(B4)以及南苏鲁造山带(C1)的 ΣREE 、 ΣLREE 、 ΣHREE 在岩石中的含量均低于土壤,即华北克拉通和南苏鲁造山带的土壤发生了一定程度的富集,同时 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值则表

表 6 兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带岩石稀土元素参数

Table 6 The REE parameters of rocks on the geochemical transect of the Xingmeng Orogenic Belt-North China Craton

单元	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$	δEu	δCe	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	$(\text{La}/\text{Sm})_N$	$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$	
走廊带	140.74	126.93	12.53	9.49	0.77	0.97	10.19	2.98	1.68	
构造单元	A3	142.74	123.62	22.35	5.93	0.46	1.01	4.86	2.49	1.26
	A2	100.58	87.12	14.95	5.21	0.68	0.99	4.38	2.29	1.16
	A1	128.39	112.67	13.64	7.86	0.72	0.96	7.63	2.80	1.44
	B1	215.76	201.84	15.02	14.32	0.78	1.01	16.85	3.69	1.78
	B2	158.15	144.23	13.39	10.35	0.78	0.99	11.01	3.10	1.78
	B4	102.51	93.47	8.53	10.01	0.83	0.95	11.21	2.91	1.84
	C1	180.02	164.93	18.09	10.15	0.65	0.98	9.41	3.20	1.48
地理景观	(1)	124.38	107.69	15.10	6.92	0.73	0.97	7.12	2.59	1.41
	(2)	144.75	132.23	11.43	10.53	0.80	0.97	11.52	3.08	1.80
	(3)	158.43	141.01	18.43	7.71	0.44	1.03	5.66	2.94	1.25
土壤类型	a	123.43	106.36	18.44	5.99	0.63	1.00	4.93	2.43	1.26
	b	151.41	136.20	14.41	9.75	0.78	0.98	10.21	2.99	1.68
	c	134.99	122.02	10.27	10.09	0.80	0.97	10.99	3.05	1.79
降雨量	①	123.43	106.36	18.44	5.99	0.63	1.00	4.93	2.43	1.26
	②	129.32	116.65	14.13	7.70	0.72	0.97	7.61	2.85	1.42
	③	142.16	129.24	11.72	10.52	0.84	0.98	11.42	3.05	1.82
	④	156.75	140.89	12.30	9.31	0.71	0.96	10.15	3.03	1.71

注:表中的数值为各元素含量的中位数; ΣREE 、 ΣLREE 、 ΣHREE 单位为 $\mu\text{g/g}$;A3.大兴安岭北段造山带;A2.大兴安岭南段造山带;A1.华北北缘造山带;B1.内蒙地块;B2.燕山造山带;B4.鲁西地块;C1.南苏鲁造山带;地理景观:(1)半干旱草原;(2)冲积平原;(3)低山丘陵;土壤类型:a.灰钙土—棕钙土带;b.黑钙土—栗钙土—黑垆土带;c.棕壤—褐土带;降雨量:①50~200 mm;②200~400 mm;③400~800 mm;④800~1 600 mm。

现出在岩石中比例高于土壤,表明相对其岩石,在华北克拉通和南苏鲁造山带土壤中轻稀土比例相对重稀土降低。

从地理景观看, ΣREE 、 ΣLREE 、 ΣHREE 在半干旱草原上岩石中含量大于土壤,而在山地丘陵中岩石低于土壤,在沉积平原区则是 ΣREE 、 ΣLREE 在岩石低于土壤,而 ΣHREE 在岩石大于土壤; $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值则在半干旱草原和冲积平原表现为岩石低于土壤,而在山地丘陵中则岩石大于土壤.这表明,就稀土元素含量而言,在山地丘陵和冲积平原地区土壤相对于其对应单元内岩石含量增加(除冲积平原中 ΣHREE 在土壤含量低于岩石),在半干旱草原上土壤相对对应岩石含量降低;而就 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值表明在半干旱草原和冲积平原区,与其对应岩石相比较,轻稀土元素相对重稀土元素在土壤相对比例升高,而在山地丘陵的土壤中相对比例降低。

从土壤类型看, ΣREE 、 ΣLREE 、 ΣHREE 在灰钙土—棕钙土带和黑钙土—栗钙土—黑垆土带的岩石中的含量大于土壤,仅在棕壤—褐土带中岩石中含量低于土壤;而 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值则是在黑钙土—栗钙土—黑垆土带和棕壤—褐土带中岩石大于土壤,而仅在灰钙土—棕钙土带中岩石低于土壤.这表明在灰钙土—棕钙土带和黑钙土—栗钙土—黑垆土带的稀土元素含量土壤相对对应岩石发

生贫化,而在棕壤—褐土带中相对发生了富集;而 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值则表明了灰钙土—棕钙土带中相对于重稀土元素而言,轻稀土元素在土壤中所占比例升高,而在黑钙土—栗钙土—黑垆土带和棕壤—褐土带中轻稀土元素则所占比例降低。

从降雨量看, ΣREE 、 ΣLREE 、 ΣHREE 在 50~200 mm 和 200~400 mm 区间表现为岩石中的含量高于土壤,在 400~800 mm 和 800~1 600 mm 区间则岩石中的含量低于土壤;而 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值则除 400~800 mm 区间岩石中高于土壤外,在其余降雨量区间均是岩石中低于土壤.这表明相对其对应区间岩石而言,在 50~400 mm 降雨量区间,稀土元素含量在土壤中发生贫化,而在 400~1 600 mm 区间,稀土元素含量在土壤中升高;以对应区间岩石为标准, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值在 50~400 mm 降雨量区间,轻稀土元素相对重稀土元素而言比例升高,在 800~1 600 mm 区间轻稀土比重稀土在土壤比岩石中稍高,但比值相当接近(9.72和 9.31),仅在 400~800 mm 降雨量区间,土壤中轻稀土元素比重稀土元素所占比例相对其岩石降低。

由图 3 可知,从西北内蒙古红格尔至东南江苏连云港,构造单元依次为兴蒙造山带(A3、A2、A1)、华北克拉通(B1、B2、B3、B4)和南苏鲁造山带(C1),地理景观从内蒙古半干旱草原到河北张家口的山地

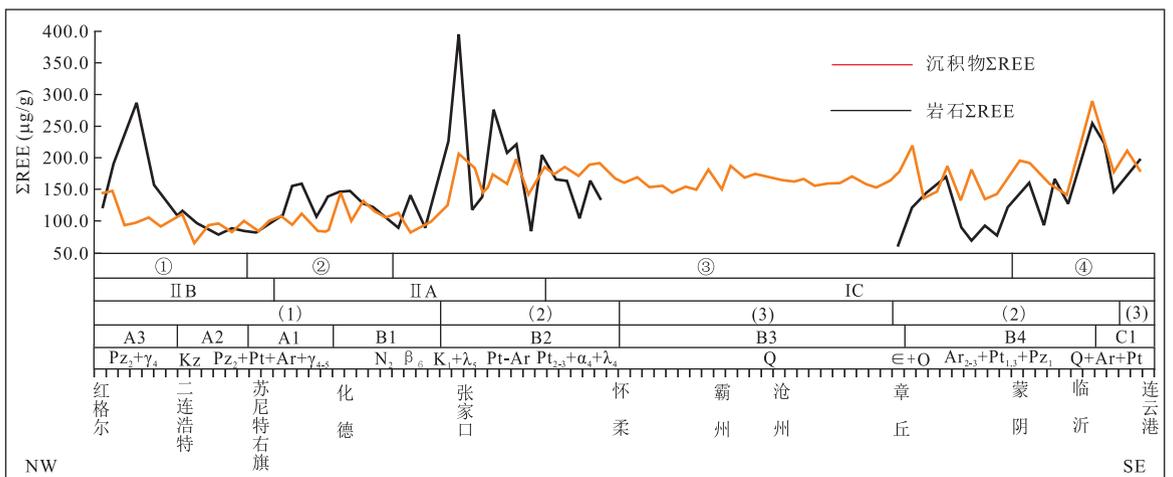


图 3 兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带土壤与岩石 ΣREE 空间分布

Fig.3 The spatial distribution of ΣREE in regoliths and rocks on the geochemical transect of the Xingmeng Orogenic Belt—North China Craton

A3.大兴安岭北段造山带;A2.大兴安岭南段造山带;A1.华北北缘造山带;B1.内蒙地块;B2.燕山造山带;B3.华北盆地;B4.鲁西地块;C1.南苏鲁造山带;地理景观:(1)半干旱草原;(2)低山丘陵;(3)冲积平原;土壤类型:II B.灰钙土—棕钙土带;II A.黑钙土—栗钙土—黑垆土带;I C.棕壤—褐土带;降雨量:①50~200 mm;②200~400 mm;③400~800 mm;④800~1 600 mm

丘陵,怀柔以南为华北冲积平原,然后在章丘以南再次出现山地丘陵,最后在过临沂后直到江苏连云港为冲积平原,土壤类型从黑钙土—栗钙土—黑垆土带到棕壤—褐土带再到棕壤—褐土带,降雨量从 50 mm 升高至 1 600 mm.在兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带上,从土壤 Σ REE 含量空间分布折线图看,其 Σ REE 呈现明显的两级台阶状分布,且与地理景观划分具有较好的空间对应关系,尤其是在内蒙古红格尔至河北张家口之间,地理景观为半干旱草原沙土,气候干燥寒冷,降雨量少,物理风化作用较强,导致沉积物中富含石英、长石,粘土矿物不甚发育,土壤 Σ REE 整体较低(66.84 ~ 145.47 $\mu\text{g/g}$,均值为 102.66 $\mu\text{g/g}$),只在红格尔和化德地区出现局部高含量(略小于 150 $\mu\text{g/g}$);而在河北张家口至山东临沂之间,主要分布太古代—元古代基底老地层以及一些中酸性火山岩,粘土矿物相对发育,土壤 Σ REE 整体较高(124.56 ~ 219.21 $\mu\text{g/g}$,均值为 165.76 $\mu\text{g/g}$),含量变化较大;而在山东临沂至江苏连云港之间,土壤 Σ REE 整体偏高,在 176.42~289.37 $\mu\text{g/g}$,均值为 215.80 $\mu\text{g/g}$.说明了在本走廊带范围内,地理景观和黏土矿物含量对影响稀土元素含量变化的重要因素.

不同岩石类型中稀土元素含量存在极大差异,且每个五万图幅求取的是该图幅范围内所有类型岩石 Σ REE 的平均值,因此相对于土壤,岩石的

Σ REE 含量在空间展布上表现出明显的差异性且波动性也较大.由于本走廊带采样路线在穿越整个华北平原分布区缺少可采集的岩石样品而无该区间的岩石 Σ REE 含量数据.在华北平原以北,从内蒙古红格尔到北京怀柔之间,岩石 Σ REE 含量低值分布区位于二连浩特与苏尼特右旗之间(76.65 ~ 97.79 $\mu\text{g/g}$),只在红格尔到二连浩特之间,分布有大量的海西期—燕山期花岗岩,岩石中稀土含量较高;而在张家口附近最高达 394.88 $\mu\text{g/g}$;在华北平原以南,从山东章丘至江苏连云港,岩石中 Σ REE 含量最低值为 61.11 $\mu\text{g/g}$,位于山东章丘所在的五万图幅,其次在章丘和蒙阴之间还存在一个 Σ REE 含量较低(68.55~93.23 $\mu\text{g/g}$)区域,而最高含量位于临沂靠南的区域(254.13 $\mu\text{g/g}$).除去以上区域,整体而言,岩石中 Σ REE 含量呈明显“锯齿状”分布,高含量与低含量相间出现,这种特殊现象的出现反映了本走廊带所穿越的路线地壳出露岩石的类型和地层时代分布的复杂程度,见图 1.

从图 3 反映出一个较为明显的土壤中 Σ REE 含量和岩石中 Σ REE 含量之间的关系:整体而言,从内蒙古红格尔到北京怀柔,除靠近怀柔地区土壤中 Σ REE 含量高于岩石外,其余地区土壤 Σ REE 含量几乎都低于岩石中 Σ REE 含量;而在山东章丘直到江苏连云港之间,呈现相反的特点,沉积中 Σ REE 含量几乎均大于岩石中 Σ REE 含量.综上所

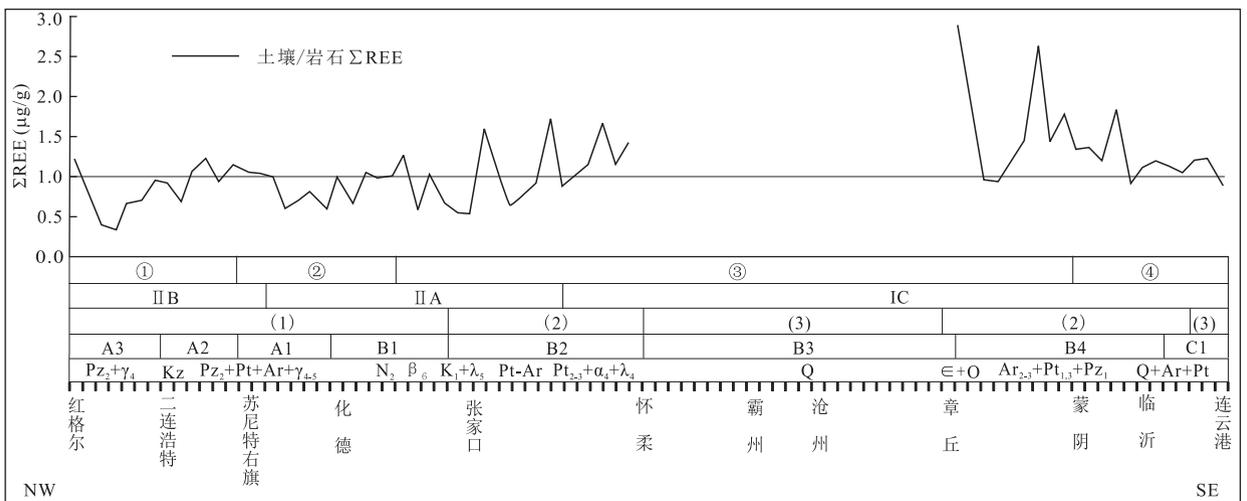


图 4 兴蒙造山带—华北克拉通地球化学走廊带土壤/岩石比值空间分布

Fig.4 The spatial distribution of regolith/rocks ratio on the geochemical transect of the Xingmeng Orogenic Belt-North China Craton

A3.大兴安岭北段造山带; A2.大兴安岭南段造山带; A1.华北北缘造山带; B1.内蒙地块; B2.燕山造山带; B3.华北盆地; B4.鲁西地块; C1.南苏鲁造山带; 地理景观: (1)半干旱草原; (2)低山丘陵; (3)冲积平原; 土壤类型: II B.灰钙土—棕钙土带; II A.黑钙土—栗钙土—黑垆土带; I C.棕壤—褐土带; 降雨量: ①50~200 mm; ②200~400 mm; ③400~800 mm; ④800~1 600 mm

述,在内蒙古红格尔至靠近北京怀柔之间,土壤中的 Σ REE 相对于对应格子内岩石的 Σ REE 保持基本不变甚至出现明显贫化(例如在红格尔至二连浩特之间以及张家口附近土壤中 Σ REE 明显贫化);而在山东章丘至江苏连云港之间,土壤中 Σ REE 相对于对应格子内岩石的 Σ REE 保持基本不变或发生一定程度的富集,贫化或富集程度见图 4.综合本走廊带的土壤和岩石 Σ REE 含量的空间分布特征,岩石的稀土元素含量整体上决定了土壤中稀土元素含量的基础,而土壤经历后期的风化作用,在降雨量、温度等气候因素(可能还存在生物作用和人类工农业活动影响)影响下土壤在走廊带上,表现为更复杂的局部空间含量变化.

4.3 土壤与岩石稀土配分模式空间对比

由图 5 可知,在整个走廊带及各构造单元中土壤与岩石稀土元素配分曲线,整体均表现为右倾轻稀土富集的土地壳配分模式.

从总体看,整个走廊带土壤相对岩石,REE 曲线位于上方而表明含量较高,整体而言土壤稀土发生富集,尤其 HREE 相较于 LREE 富集程度更显著,则可能反映了 LREE 和 HREE 在地表表生条件下,土壤中不同矿物中富集能力的差别,尤其 HREE 形成的重碳酸盐和有机络合物比 LREE 形成后更容易迁移(亨德森,1989).就 REE 在土壤和岩石之间的含量高低而言,二级构造单元之间表现为:兴蒙造山带的大兴安岭北段造山带(A3)、大兴安岭南段造山带(A2)、华北北缘造山带(A1)及华北克拉通的内蒙地块(B1)的岩石稀土配分曲线位于土壤配分曲线之上,表明土壤的 REE 发生不同程

度的亏损,这种现象(尤其属于华北克拉通的内蒙地块,其岩石与土壤的稀土配分曲线与新造山带更相似)表明内蒙古红格尔到河北张家口一带统一的地球化学景观(半干旱草原沙土分布区)的影响,地理景观对土壤的稀土含量和特征的影响区域可以跨越一级构造单元;而华北克拉通的燕山造山带(B2)、鲁西地块(B4)的土壤与岩石配分曲线与之相反,尤其是 HREE 在土壤中相对于岩石发生轻微程度的富集,而南苏鲁造山带(C1)土壤相对于岩石曲线基本重合,无明显的 HREE 富集特征.就 LREE 差异而言,燕山造山带(B2)、鲁西地块(B4)及南苏鲁造山带(C1)配分曲线几乎完全重合,差异极小,而在内蒙地块(B1)LREE 的配分曲线间隔较远,差异较大;就 HREE 而言,在南苏鲁造山带(C1)配分曲线几乎完全重合,差异较小,而大兴安岭北段造山带(A3)、大兴安岭南段造山带(A2)配分曲线分开最大,差异较大;特别地,就 Eu 的含量而言,在内蒙地块(B1)的土壤与岩石中的 Eu 含量相差较大,而其他构造单元 Eu 含量基本一致.

综上所述,土壤与岩石的稀土配分曲线整体均呈现出 LREE 富集的右倾模式,在兴蒙造山带均表现为岩石的稀土配分曲线在土壤之上,表明土壤中稀土发生了一定亏损,这与半干旱草原沙土较少的黏土含量有关;除内蒙地块(B1)受到内蒙半干旱草原地理景观的影响外,华北克拉通土壤的配分曲线则均在岩石上方,且在 HREE 中表现更明显,沉积物经过搬运迁移,HREE 形成的重碳酸盐和有机络合物迁移能力更强,则说明了稀土元素之间微小的地球化学性质对在土壤与岩石中的轻重稀土含量的差异也有一定影响.

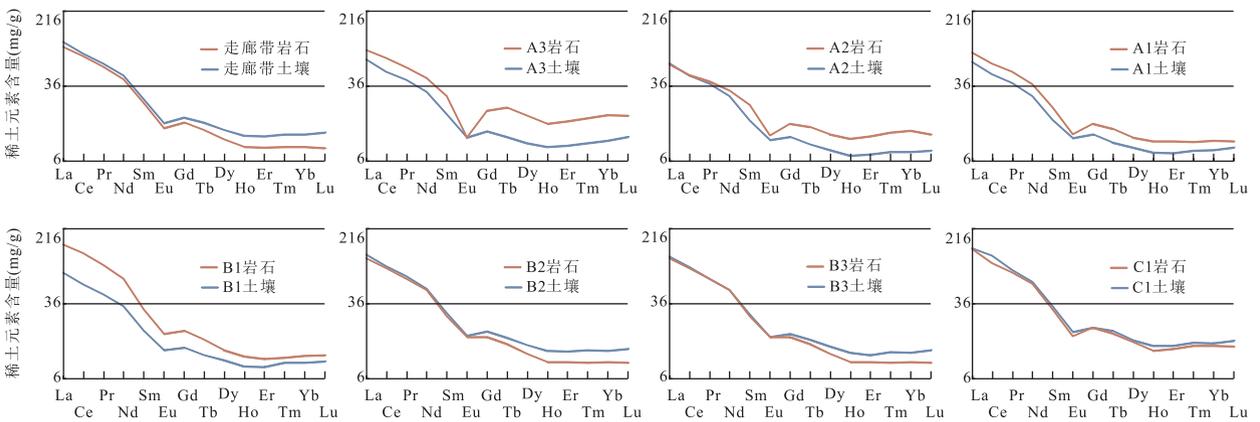


图 5 兴蒙造山带—华北克拉通土壤与岩石不同构造单元配分模式对比

Fig.5 The REE distribution patterns of regoliths and rocks in different secondary tectonic units on the geochemical transect of the Xingmeng Orogenic Belt-North China Craton

5 结论

(1) 稀土元素的含量和空间分布表明,在表生条件下,地理景观和土壤类型(黏土矿物组成和含量)是影响土壤中 REE 含量的重要因素,反映出土壤所经历风化作用的影响;土壤中轻—重稀土分馏程度最明显,其次是轻—中稀土的分馏,而中—重稀土分馏程度最低。土壤稀土元素配分模式,其受构造单元和地理景观影响,后者更显著,如尽管南苏鲁造山带与鲁西地块属于不同构造单元,但土壤的稀土配分曲线相似,这两单元地理景观和土壤类型基本一致;内蒙地块虽属于华北克拉通,但其土壤稀土配分模式曲线与兴蒙造山带更相似,二者地理景观和土壤类型(黏土矿物组成和含量)也更一致。

(2) 稀土元素以 La 为例,其含量在不同岩性之间的在 $34.39 \sim 71.89 \mu\text{g/g}$, 差值为 $37.50 \mu\text{g/g}$; 不同构造单元在 $13.72 \sim 51.63 \mu\text{g/g}$, 差值为 $37.91 \mu\text{g/g}$, 地质年代在 $24.97 \sim 54.76 \mu\text{g/g}$, 差值为 $29.79 \mu\text{g/g}$, 花岗岩稀土元素含量的在不同岩性和构造单元差异相较地质时代要大。而且同一类花岗岩在不同地质时代也存在含量和稀土特征的差异,这表明其在不同地质时代形成过程所经历的不同地质环境;花岗岩轻稀土元素与重稀土元素在表生条件下迁移能力,因其微小差异的地球化学性质差异,表现出在不同岩性、构造单元、地质时代间的含量和空间差异。

(3) 土壤和岩石中 REE 在不同构造单元中的稀土元素配分曲线整体表现为右倾 LREE 富集模式,其二者的对比也表明了构造单元与地理景观对土壤中稀土元素含量均有影响,表明这与土壤和岩石的含量对比一致;不同构造单元的土壤与岩石对比所表现出的 HREE 与 LREE 含量差异特征,主要是 HREE 在表生条件下形成的重碳酸盐和有机络合物更易迁移。

(4) 综合本走廊带的土壤和岩石 Σ REE 含量的空间分布特征,表明源区决定了稀土元素含量在不同单元之间的整体差异,但比较稳定的 REE 在表生条件下含量变化也受后期地理景观、降雨量等环境因素影响。这突出了在地球表层复杂系统中,表生环境的影响因素复杂而且较为重要,如:地理景观、气候因素,此外生物作用和人类工、农业活动对土壤含量变化的影响值得关注,其复杂的机理值得更系统深入的研究。

致谢:国土资源部公益性行业科研专项课题“地球化学走廊带探测实验与示范”对本论文进行资助,

稀土元素的分析在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所实验室完成,论文撰写过程中还得到了谭亲平博士一些中肯的修改建议,在此一并表示衷心感谢!同时感谢匿名审稿人对本论文的审阅!

References

- Cao, J.J., Zhang, X.Y., Wang, D., et al., 2001. REE Geochemistry of Late Cenozoic Eolian Sediments and the Paleoclimate Significance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(1): 97–101 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y., Wang, X.R., Peng, A., 1999. The Research Progress of Fractionation among the Rare Earth Elements. *Advances in Environmental Science*, 7(1): 10–17 (in Chinese with English abstract).
- Chi, Q.H., 2002. Abundance of Gold in Crust, Rocks and Sediments. *Geochimica*, 31(4): 347–353 (in Chinese with English abstract).
- Chi, Q.H., 2004. Abundance of Mercury in Crust, Rocks and Loose Sediments. *Geochimica*, 33(6): 641–648 (in Chinese with English abstract).
- Chi, Q.H., Yan, M.C., 2006. Platinum-Group Element Abundances in Crust, Rocks and Sediments. *Geochimica*, 35(5): 461–471 (in Chinese with English abstract).
- Chi, Q.H., Yan, M.C., 2007. Handbook of Geochemical Element Abundances Data. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Drew, L.J., Grunsky, E.C., Sutphin, D.M., et al., 2010. Multivariate Analysis of the Geochemistry and Mineralogy of Soils along Two Continental-Scale Transects in North America. *Science of the Total Environment*, 409(1): 218–27. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.004>
- Fan, Q.C., Liu, R.X., Li, H.M., 1998. The Hannuoba Granulite Xenoliths Zircon Geochronology and Geochemistry of Rare Earth Elements. *Chinese Science Bulletin*, 43(2): 133–137 (in Chinese with English abstract).
- Feng, C.X., Liu, S., Hu, R.Z., et al., 2010. Geochemistry of Lower Cambrian Se-Rich Black Rock Series in Zunyi, Guizhou Province, Southwest China: The Petrogenesis and Enrichment Mechanism of Selenium. *Earth Science*, 35(6): 947–958 (in Chinese with English abstract).
- Fu, W., Huang, X.R., Yang, M.L., et al., 2014. REE Geochemistry in the Laterite Crusts Derived from Ultramafic Rocks: Comparative Study of Two Laterite Profiles under Different Climate Condition. *Earth Science*, 39(6): 1745–1757 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., 1999. Discussions on Some Problems in Research into Chemical Compositions of Continental Crust. *Earth Science*, 24(3): 228–233 (in Chinese with English abstract).

- Guo, H. M., Zhang, B., Li, Y., et al., 2010. Concentrations and Patterns of Rare Earth Elements in High Arsenic Groundwaters from the Hetao Plain, Inner Mongolia. *Earth Science Frontiers*, 17(6): 59–66 (in Chinese with English abstract).
- Henderson, P., 1989. *Geochemistry of Rare Earth Elements*. Translated by Tian, F. and Shi, L., Geological Publishing House, Beijing, 195–213 (in Chinese).
- Hou, H. X., Zhang, D. H., Zhang, R. Z., 2016. The Chronology, Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Mesozoic Shiyagou Hidden Granite at the East Qinling. *Earth Science*, 41(10): 1665–1682 (in Chinese with English abstract).
- Lan, X. H., Li, R. H., Mi, B. B., et al., 2016. Distribution Characteristics of Rare Earth Elements in Surface Sediment and Their Provenance Discrimination in the Eastern Bohai and Northern Yellow Seas. *Earth Science*, 41(3): 463–474 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. L., 2000. REE Geochemical Features of Carbonate Rocks and Its Paleokarst Significance in the Ordovician in Northern Anhui. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 353 (in Chinese with English abstract).
- Li, L. X., Li, H. M., Wang, D. H., et al., 2009. Trace Element and REE Geochemistry and Its Metallogenic Significance for Cu-Zn Deposits in the Tongbai Area, Henan. *Earth Science Frontiers*, 16(6): 325–336 (in Chinese with English abstract).
- Ling, Q. C., Liu, C. Q., 2001. Geochemistry of Trace Elements during Ore-Forming Processes in Yinshan Deposit. *Earth Science*, 26(5): 473–480 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. G., Chen, Z., Yan, W., et al., 2010. Geochemical Characteristics of Rare Earth Elements in the Fine-Grained Fraction of Surface Sediment from South China Sea. *Earth Science*, 35(4): 563–571 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. J., Huo, R. K., Xu, Z. F., et al., 2004. REE Behavior and Influence Factors during Chemical Weathering. *Advance in Earth Sciences*, 19(1): 87–94 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. B., He, G. W., Yao, H. Q., et al., 2016. Geochemistry and Significance of REE and PGE of the Cobalt-Rich Crusts from West Pacific Ocean Seamounts. *Earth Science*, 41(10): 1745–1757 (in Chinese with English abstract).
- Smith, D. B., Reimann, C., 2008. Low-Density Geochemical Mapping and the Robustness of Geochemical Patterns. *Geochemistry Exploration Environment Analysis*, 8(3–4): 219–227. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/08-171>
- Wang, L. J., Wang, Y. Q., Zhang, S., et al., 1997. Speciation of Rare Earth Elements in Different Types of Soils in China. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 15(1): 65–71 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Q., 2012. Global Geochemical Baselines: Understanding the Past and Predicting the Future. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 854–864 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Q., 2014. China Geochemical Baselines: Sampling Methodology. *Journal of Geochemical Exploration*, 148: 25–39. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.05.018>
- Wang, X. Q., Liu, X. M., Han, Z. X., et al., 2015. Concentration and Distribution of Mercury in Drainage Catchment Sediment and Alluvial Soil of China. *Journal of Geochemical Exploration*, 154: 32–48. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.01.008>
- Wang, X. Q., Xie, X. J., Zhang, B. R., et al., 2010. China Geochemical Probe: Making “Geochemical Earth”. *Acta Geologica Sinica*, 84(6): 854–864 (in Chinese with English abstract).
- Wei, L., Guo, H. M., Xie, Z. H., et al., 2010. Rare Earth Elements Geochemistry and Its Implication for Sediment Provenance in the Beijing Plain. *Earth Science Frontiers*, 17(6): 72–80 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. J., Wang, Y. X., Li, J. X., et al., 2012. Characteristics and Implications of Rare Earth Elements in High Arsenic Groundwater from the Datong Basin. *Earth Science*, 37(2): 381–390 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. Y., Meng, J., Guo, L. F., et al., 2013. REE Geochemistry for Sand-Dust Fallouts in Harbin, Heilongjiang Province and Provenance Analysis. *Earth Science*, (5): 923–933 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, G. Q., Jiang, X. S., Cai, X. Y., et al., 2010. The Characteristics of Trace Element and REE Geochemistry of the Cretaceous Mudrocks and Shales from Southern Tibet and Its Analysis of Redox Condition. *Advances in Earth Science*, 25(7): 730–745 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Y., Li, C. X., 1999. Research Progress in REE Tracer for Sediment Source. *Acta Electronica Sinica*, 14(2): 164–167 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Y., Li, C. X., Lee, C. B., 2003. Geochemistry of Rare Earth Elements and Sediment Source Tracing in the Yellow Sea. *Chinese Science Bulletin*, 48(11): 1233–1236 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Zhu, Z. Y., Wu, Y., et al., 2010. Rare Earth Elements Geochemistry in Topsoils from the Eastern Part of China. *Earth Science Frontiers*, 17(3): 233–241 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. L., Zhu, M. Y., Zhao, Y. L., et al., 2012. REE Geochemical Characteristics of the Ediacaran-Lower Cambrian Black Rock Series in Eastern Guizhou. *Geological Review*, 54(1): 3–15 (in Chinese with English abstract).

- Zhang, Q., Bai, J. F., Wang, Y., 2012. Analytical Scheme and Quality Monitoring System for China Geochemical Baselines. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 33–42 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, S., Xu, W. L., Tang, J., et al., 2016. Neoproterozoic Magmatic Events and Tectonic Attribution of the Erguna Massif: Constraints from Geochronological, Geochemical and Hf Isotopic Data of Intrusive Rocks. *Earth Science*, 41(11): 1803–1829 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. Y., Yan, M. C., 1993. Abundance of Chemical Elements in Sediments of Shallow Sea of China. *Science China Earth Sciences*, 23(10): 1084–1090 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, L. M., Du, J. M., Zhang, Y. H., et al., 2006. Tracing the Sediment Source at E2 Hole in the South Yellow Sea with Rare Earth Element and Trace Element. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(3): 495–500 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 曹军骥, 张小曳, 王丹, 等, 2001. 晚新生代风尘沉积的稀土元素地球化学特征及其古气候意义. 海洋地质与第四纪地质, 21(1): 97–101.
- 陈莹, 王晓蓉, 彭安, 1999. 稀土元素分馏作用研究进展. 环境科学进展, (1): 10–17.
- 迟清华, 2002. 金在地壳、岩石和沉积物中的丰度. 地球化学, 31(4): 347–353.
- 迟清华, 2004. 汞在地壳、岩石和疏松沉积物中的分布. 地球化学, 33(6): 641–648.
- 迟清华, 鄢明才, 2006. 铂族元素在地壳、岩石和沉积物中的分布. 地球化学, 35(5): 461–471.
- 迟清华, 鄢明才, 2007. 应用地球化学元素丰度数据手册. 北京: 地质出版社.
- 高山, 1999. 关于大陆地壳化学组成研究中某些问题的讨论. 地球科学, 24(3): 228–233.
- 樊祺诚, 刘若新, 李惠民, 等, 1998. 汉诺坝捕虏体麻粒岩锆石年代学与稀土元素地球化学. 科学通报, 43(2): 133–137.
- 冯彩霞, 刘燊, 胡瑞忠, 等, 2010. 遵义下寒武统富硒黑色岩系地球化学: 成因和硒富集机理. 地球科学, 35(6): 947–958.
- 付伟, 黄小荣, 杨梦力, 等, 2014. 超基性岩红土风化壳中 REE 地球化学: 不同气候风化剖面的对比. 地球科学, 39(6): 716–732.
- 郭华明, 张波, 李媛, 等, 2010. 内蒙古河套平原高钾地下水中稀土元素含量及分异特征. 地学前缘, 17(6): 59–66.
- 亨德森, P., 1989. 稀土元素地球化学. 田丰, 施焯, 译. 北京: 地质出版社, 195–213.
- 侯红星, 张德会, 张荣臻, 2016. 东秦岭中生代石瑶沟隐伏花岗岩年代学、地球化学特征及地质意义. 地球科学, 41(10): 1665–1682.
- 蓝先洪, 李日辉, 密蓓蓓, 等, 2016. 渤海东部和黄海北部表层沉积物稀土元素的分布特征与物源判别. 地球科学, 41(3): 463–474.
- 李定龙, 2000. 皖北奥陶系碳酸盐岩稀土元素地球化学特征及其古岩溶意义. (2): 353.
- 李立兴, 李厚民, 王登红, 等, 2009. 河南桐柏地区铜锌多金属矿床的微量元素和稀土元素特征及成因意义. 地学前缘, 16(6): 325–336.
- 刘建国, 陈忠, 颜文, 等, 2010. 南海表层沉积物中细粒组分的稀土元素地球化学特征. 地球科学, 35(4): 563–571.
- 凌其聪, 刘丛强, 2001. 银山矿床成矿作用微量元素地球化学研究. 地球科学, 26(5): 473–480.
- 马英军, 霍润科, 徐志方, 等, 2004. 化学风化作用中的稀土元素行为及其影响因素. 地球科学进展, 19(1): 87–94.
- 任江波, 何高文, 姚会强, 等, 2016. 西太平洋海山富钴结壳的稀土和铂族元素特征及其意义. 地球科学, 41(10): 1745–1757.
- 王立军, 王玉琦, 章申, 等, 1997. 中国不同类型土壤中稀土元素的形态分布特征. 中国稀土学报, 15(1): 65–71.
- 王学求, 2012. 全球地球化学基准: 了解过去, 预测未来. 地学前缘, 19(3): 854–864.
- 王学求, 谢学锦, 张本仁, 等, 2010. 地壳全元素探测——构建“化学地球”. 地质学报, 84(6): 854–864.
- 魏亮, 郭华明, 谢振华, 等, 2010. 北京平原沉积物稀土元素地球化学特征及物源意义. 地学前缘, 17(6): 72–80.
- 谢先军, 王焰新, 李俊霞, 等, 2012. 大同盆地高钾地下水稀土元素特征及其指示意义. 地球科学, 37(2): 381–390.
- 谢远云, 孟杰, 郭令芬, 等, 2013. 哈尔滨沙尘沉降物稀土元素地球化学特征及其物源分析. 地球科学, 38(5): 923–933.
- 熊国庆, 江新胜, 蔡习尧, 等, 2010. 藏南白垩系泥、页岩微量稀土元素特征及氧化—还原环境分析. 地球科学进展, 25(7): 730–745.
- 杨守业, 李从先, 1999. REE 示踪沉积物物源研究进展. 地球科学进展, 14(2): 164–167.
- 杨守业, 李从先, Lee, C. B., 等, 2003. 黄海周边河流的稀土元素地球化学及沉积物物源示踪. 科学通报, 48(11): 1233–1236.
- 杨恬, 朱照宇, 吴翼, 等, 2010. 中国东部地带表土稀土元素的地球化学特征. 地学前缘, 17(3): 233–241.
- 杨兴莲, 朱茂炎, 赵元龙, 等, 2012. 黔东震旦系一下寒武统黑色岩系稀土元素地球化学特征. 地质论评, 54(1): 3–15.
- 张勤, 白金峰, 王焯, 2012. 地壳全元素配套分析方案及分析质量监控系统. 地学前缘, 19(3): 33–42.
- 赵硕, 许文良, 唐杰, 等, 2016. 额尔古纳地块新元古代岩浆作

用与微陆块构造属性:来自侵入岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Hf 同位素的制约.地球科学,41(11):1803—1829.

赵一阳,鄢明才,1993.中国浅海沉积物化学元素丰度.中国科

学:地球科学,23(10):1084—1090.

朱赖民,杜俊民,张远辉,等,2006.南黄海中部 E2 柱样沉积物来源的稀土元素及微量元素示踪.环境科学学报,26(3):495—500.

* * * * *

《地球科学》和《Journal of Earth Science》2017 年度优秀编委和高被引作者评选揭晓

近日,《地球科学》编委会和编辑部评选出了 2017 年度优秀编委和高被引作者。

优秀编委的评选,依据组稿、撰稿、审稿数量和质量以及期刊宣传推广等方面所做的贡献综合评定,有 4 位:北京大学地球与空间科学学院魏春景、中国科学院广州地球化学研究所陈华勇、中国地质大学(武汉)地球科学学院谢树成、中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院蔡建超。

高被引作者的评选,考察其 2015 年发表在《地球科学》和《Journal of Earth Science》的论文到 2017 年底的总被引次数,分别以中国知网数据库和 Web of Science 核心合集中总被引频次由高到低排序,中国地质大学(武汉)地球科学学院张克信等作者入选,名单如下。

2017 年度《地球科学》高被引作者

张克信,等,2015.中国构造—地层大区划分新方案.地球科学,40(2):206—233.

朱伟林,等,2015.南海西沙西科 1 井层序地层格架与礁生长单元特征.地球科学,40(4):677—687.

吴松涛,等,2015.鄂尔多斯盆地上三叠统长 7 段泥页岩储集性能.地球科学,40(11):1810—1823.

张林晔,等,2015.湖相页岩有机储集空间发育特点与成因机制.地球科学,40(11):1824—1833.

梅 微,等,2015.大兴安岭南段西坡拜仁达坝—维拉斯托矿床成矿流体特征及其演化.地球科学,40(1):145—162.

桂丽黎,等,2015.柴达木盆地西部英东地区油气成藏过程.地球科学,40(5):890—899.

邓娅敏,等,2015.江汉平原中中毒病区地下水砷形态季节性变化特征.地球科学,40(11):1876—1886.

王维珠,等,2015.江口盆地惠州凹陷古近纪多幕裂陷旋回的沉积物源响应.地球科学,40(6):1061—1071.

黄强太,等,2015.西藏班公湖—怒江缝合带中段江错蛇绿岩岩石学、地球化学、年代学及地质意义.地球科学,40(1):34—48.

雷 超,等,2015.南海构造变形分区及成盆过程.地球科学,40(4):744—762.

2017 年度《Journal of Earth Science》高被引作者

Pan,S.Q.,et al.,2015.Methods for Shale Gas Play Assessment:A Comparison between Silurian Longmaxi Shale and Mississippian Barnett Shale.*Journal of Earth Science*,26(2):285—294.

Xing,H.L.,et al.,2015.Recent Development in Numerical Simulation of Enhanced Geothermal Reservoirs.*Journal of Earth Science*,26(1):28—36.

Wang,H.Y.,et al.,2015.Spurious Thermoluminescence Characteristics of the Ediacaran Doushantuo Formation (Ca.635—551 Ma) and Its Implications for Marine Dissolved Organic Carbon Reservoir.*Journal of Earth Science*,26(6):883—892.

Zuo,Y.H.,et al.,2015.Meso-Cenozoic Tectono-Thermal Evolution History in Bohai Bay Basin,North China.*Journal of Earth Science*,26(3):352—360.

Yang,H.,et al.,2015.Microconchids from Microbialites near the Permian-Triassic Boundary in the Zuodeng Section, Baise Area, Guangxi Zhuang Autonomous Region,South China and Their Paleoenvironmental Implications.*Journal of Earth Science*,26(2):157—165.

Ogg,J.G.,2015.The Mysterious Mid-Carnian Wet Intermezzo Global Event.*Journal of Earth Science*,26(2):181—191.

Wang,Ziye,et al.,2015.Spatial Analysis of Fe Deposits in Fujian Province,China: Implications for Mineral Exploration.*Journal of Earth Science*,26(6):813—820.

Yang,J.G.,et al.,2015.Zircon Record of Ocean-Continent Subduction Transition Process of Dulan UHPM Belt,North Qaidam.*Journal of Earth Science*,26(5):617—625.

Huang,C.Y.,et al.,2015.Lacustrine Shale Deposition and Variable Tectonic Accommodation in the Rift Basins of the Bohai Bay Basin in Eastern China.*Journal of Earth Science*,26(5):700—711.

Lin,J.,et al.,2015.Review of High-Precision Sr Isotope Analyses of Low-Sr Geological Samples.*Journal of Earth Science*,26(5):763—774.

Hu,H.Y.,et al.,2015.Key Elements Controlling Oil Accumulation within the Tight Sandstones.*Journal of Earth Science*,26(3):328—342.