

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2024032503

查春雷, 袁二军, 史立群, 等. 某工业园区表层土壤稀土元素地球化学特征[J]. 环境化学, 2024, 43(8): 2695-2703.

ZHA Chunlei, YUAN Erjun, SHI Liqun, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements in surface soil of an industrial park[J]. Environmental Chemistry, 2024, 43 (8): 2695-2703.

某工业园区表层土壤稀土元素地球化学特征*

查春雷¹ 袁二军^{1**} 史立群^{2,3} 彭红明^{2,3} 丛殿阁¹ 徐建东⁴ 屈宏飞¹

(1. 青海大学地质工程学院, 西宁, 810016; 2. 青海省环境地质勘查局/青海省地质环境保护与地质灾害防治工程技术研究中心, 西宁, 810001; 3. 青海九零六工程勘察设计院有限责任公司, 西宁, 810001; 4. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁, 810016)

摘要 为探究某工业园区表层土壤中稀土元素的地球化学特征, 了解其物质来源及影响因素, 采集工业园区周边表层土壤样品, 分析稀土元素的含量及空间分布特征, 研究稀土元素的配分模式及特征参数, 并探讨稀土元素的影响因素. 结果表明: 稀土元素总含量 (W_{REE}) 范围为 52.38—155.78 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值 105.02 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 空间分布特征显示稀土元素含量大体上呈现出南高北低的特征; 球粒陨石标准化曲线表现为向右倾斜, 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损; δCe 范围为 1.00—1.09, 平均值 1.04, 存在轻微的正异常; δEu 范围为 0.65—0.76, 平均值 0.71, 存在一定的负异常; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 范围为 5.96—10.01, 平均值 7.86, 轻重稀土元素之间存在显著的分异现象; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 范围为 2.98—4.24, 平均值 3.42, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 范围为 1.41—1.92, 平均值 1.65, 轻稀土元素存在明显的分馏, 重稀土元素分馏程度较低; 研究区的成土母质是影响土壤稀土元素含量的主要因素, 化学风化活动和矿物导致了轻重稀土元素的分异, 人类活动影响了研究区土壤中稀土元素的空间分布, 表明土壤中稀土元素主要来自于自然因素, 但后期人类活动也会使其在空间上产生分异.

关键词 工业园区, 土壤, 稀土元素, 空间分布, 影响因素.

中图分类号 P595; X-1; O6 文献标识码 A

Geochemical characteristics of rare earth elements in surface soil of an industrial park

ZHA Chunlei¹ YUAN Erjun^{1**} SHI Liqun^{2,3} PENG Hongming^{2,3} CONG Diange¹
XU Jiandong⁴ QU Hongfei¹

(1. School of Geological Engineering, Qinghai University, Xining, 810016, China; 2. Qinghai Bureau of Environmental Geology Exploration, Qinghai Engineering Research Center of Geoenvironment Protection and Geohazard prevention, Xining, 810001, China; 3. Qinghai 906 Engineering Survey and Design Institute, Xining, 810001, China; 4. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining, 810016, China)

Abstract To explore the geochemical characteristics of rare earth elements in the surface soil of an industrial park, understand their material sources and influencing factors, the surface soil samples around the industrial park were collected, and the content and spatial distribution characteristics of rare earth elements were analyzed. The distribution pattern and characteristic parameters of rare earth elements were studied, and the influencing factors of rare earth elements were discussed. The results

2024年3月25日收稿(Received: March 25, 2024).

* 湟水河流域护坡植物降盐效应及其增强边坡稳定性研究项目(k152407)资助.

Supported by the study on Salt Reduction Effect of Slope Protection Plants and their Enhancement of Slope Stability in Huangshui River Basin (k152407).

** 通信联系人 **Corresponding author**, E-mail: yuancerjun319@163.com

showed that the total content of rare earth elements (W_{REE}) ranged from 52.38 to 155.78 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, with an average value of 105.02 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. The spatial distribution characteristics showed that the content of rare earth elements was generally high in the south and low in the north. The standardization curve of chondrite is inclined to the right, light rare earth elements are enriched, and heavy rare earth elements are deficient. δCe ranges from 1.00 to 1.09, with a mean value of 1.04, and there are slight positive anomalies. δEu ranges from 0.65 to 0.76, with an average value of 0.71, with some negative anomalies. $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ ranges from 5.96 to 10.01, with an average value of 7.86. $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ ranges from 2.98 to 4.24 with an average value of 3.42, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ ranges from 1.41 to 1.92 with an average value of 1.65. There is obvious fractionation of light rare earth elements, and the fractionation degree of heavy rare earth elements is low. The soil parent material in the study area is the main factor affecting the content of rare earth elements in the soil. Chemical weathering activities and minerals lead to the differentiation of light and heavy rare earth elements. Human activities affect the spatial distribution of rare earth elements in the soil of the study area, indicating that rare earth elements in the soil mainly come from natural factors, but later human activities will also make it spatially differentiated.

Keywords industrial park, soil, rare earth element, spatial distribution, influencing factor.

稀土元素(REE)是指镧系(La-Lu)元素及具有相似化学性质的钪(Sc)和钇(Y),总计 17 个元素. 通常稀土元素可以分为轻稀土元素(LREE)与重稀土元素(HREE)两类,轻稀土元素包括镧系的 La-Eu,重稀土元素包括镧系的 Gd-Lu 以及 Y 和 Sc^[1-3]. 我国稀土资源丰富,土壤中主要以铈等轻稀土元素为主,具有“北轻南重”的分布特征^[4-6]. 稀土元素的地球化学性质较为相似且相对稳定,具有在成岩、变质和沉积等一系列地质作用的过程中不容易发生迁移的特征^[7-8]. 通过研究稀土元素的地球化学特征,可以了解该地区稀土元素的分布状态,研究中常用的特征参数主要包括 Ce 异常(δCe)和 Eu 异常(δEu)这两个重要参数,反应轻重稀土元素分异程度的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$,以及表征轻稀土元素分馏程度的系数 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 和表征重稀土分馏程度的系数 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$,目前国内外众多学者研究了不同地区土壤中稀土元素的地球化学特征,以解析稀土元素的控制因素和物质来源^[9-11].

为探究某工业园区表层土壤中稀土元素的地球化学特征,了解其物质来源及影响因素,通过测定研究区表层土壤样品中稀土元素的含量,分析研究区表层土壤中稀土元素含量的统计特征及空间分布特征,并解析土壤中稀土元素的配分模式及特征参数,最后进一步探讨研究区土壤中稀土元素的物质来源及影响因素.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区概况

该工业园区位于青海省西宁市湟中区(101.41° — 101.59°E , 36.49° — 36.63°N),拥有丰富的电力和矿产资源,正是依托此优势,园区大力发展多种金属冶炼、下游产品深加工及化肥生产等高耗能产业. 研究区(图 1)位于黄土高原与青藏高原的接触地带,地形地势较为复杂,海拔为 2225—4488 m. 研究区内存在 3 条河流,均为湟水河支流,从南端为源头最终汇入湟水河,呈条带状分布. 研究区主要为大陆性气候,但由于地处高原,与其他地区相比,会受到一定的地形地势的影响,导致其较为独特的气候环境. 冬天寒冷,夏天凉爽,但昼夜温差较大,年平均气温仅约为 5°C . 紫外线较强、光照较为充足,湿度较低,云量较少,导致其平均年降水量仅为蒸发量的一半,约 500 mm.

1.2 样品采集与处理

以该工业园区为中心,沿道路在主要工厂周边采取土壤样品. 使用非金属设备(竹片等)采集表层 0—20 cm 的土壤,在剔除石块和较大植物残体后保留约 1 kg 样品,存放于密封袋之中,此次共采集 20 个土样. 采样时需对每个采样点进行 GPS 定位,并对每个样品做好标记,采样点位置如图 1 所示.

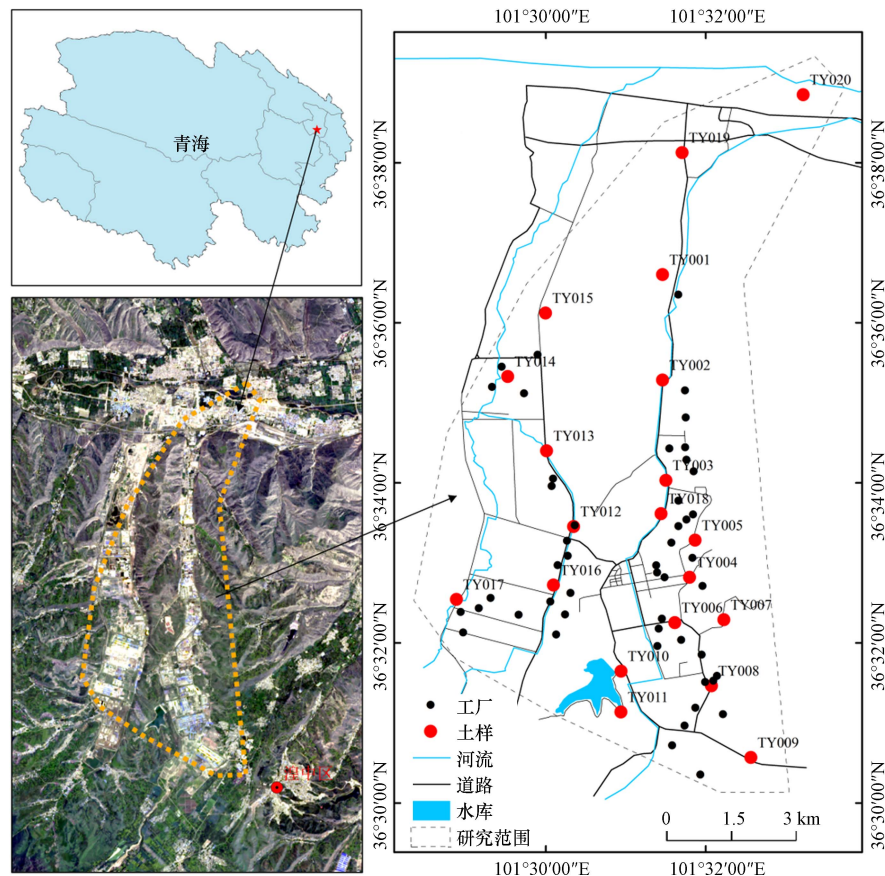


图 1 研究区及采样点分布

Fig.1 Study area and sampling point distribution

样品采集之后带回实验室进行处理. 土样处理步骤包括: 风干—研磨—过筛—消解—赶酸—定容, 具体步骤为: 将土壤样品进行自然风干, 挑出样品中的植物根系等杂物, 使用玛瑙研钵将样品进行研磨, 将样品过 200 目筛子, 然后进行消解. 消解时采用微波消解法^[12], 使用石墨赶酸仪进行赶酸操作, 然后定容至 50 mL 试管待测. 最后使用等离子体质谱法(ICP-MS)测定样品中稀土元素的含量.

1.3 数据处理

使用 Excel 2021 统计稀土元素含量数据, 使用 ArcGIS 10.2 软件进行空间插值从而得出研究区土壤稀土元素的空间分布特征, 使用 Origin 2021 软件制作稀土元素特征参数及配分模式等图件, 使用 SPSS 26 软件进行稀土元素含量的相关分析.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 稀土元素分布特征

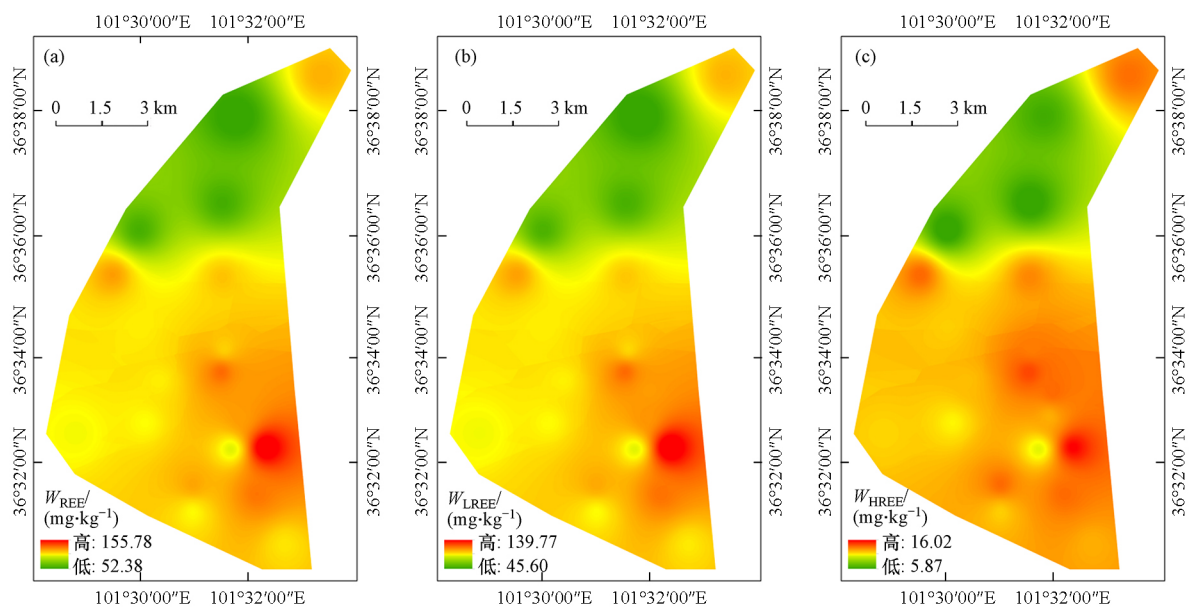
研究区土壤中稀土元素含量统计特征如表 1 所示, 所测 14 种稀土元素的平均值依次为 Ce>La>Nd>Pr>Sm>Gd>Dy>Er>Yb>Eu>Ho>Tb>Tm>Lu, 与青海省土壤背景值和中国土壤背景值^[13] 大小顺序一致, 且均未超出背景值. 从最大值来看, 除 La 外, 其余元素均超出青海省土壤背景值, Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd 和 Tb 更是超出中国土壤背景值, 但也与背景值很接近, 说明研究区有部分区域稀土元素含量超标, 但情况并不严重. 稀土元素总含量 (W_{REE}) 范围为 52.38—155.78 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 105.02 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中平均值低于背景值, 最大值介于青海省土壤背景值与中国土壤背景值之间. 轻稀土元素总含量 (W_{LREE}) 范围为 45.60—139.77 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 92.89 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占稀土元素总含量的 88.45%, 说明轻稀土元素相对富集; 重稀土元素总含量 (W_{HREE}) 范围为 5.87—16.02 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 12.13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 仅占稀土元素总含量的 11.55%, 重稀土元素相对亏损.

表 1 研究区土壤稀土元素含量统计特征($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 1 Statistical characteristics of rare earth elements content in soil of the study area ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	平均值 Average value	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	背景值 Background value	
						中国	青海省
La	31.92	9.40	20.47	4.77	23.32%	39.7	32.8
Ce	64.79	21.76	43.95	9.22	20.98%	68.4	58.3
Pr	7.61	2.45	5.06	1.05	20.77%	7.17	5.87
Nd	28.71	8.29	18.76	4.82	25.67%	26.4	23.7
Sm	5.56	1.81	3.79	0.89	23.58%	5.22	4.77
Eu	1.18	0.44	0.85	0.19	22.31%	1.03	0.93
Gd	5.12	1.80	3.62	0.85	23.59%	4.6	4.22
Tb	0.74	0.26	0.54	0.12	22.89%	0.63	0.6
Dy	4.13	1.51	3.16	0.71	22.50%	4.13	3.8
Ho	0.82	0.29	0.63	0.15	23.15%	0.87	0.77
Er	2.39	0.86	1.88	0.43	23.04%	2.54	2.32
Tm	0.34	0.13	0.27	0.06	22.55%	0.37	0.33
Yb	2.15	0.84	1.77	0.40	22.71%	2.44	2.07
Lu	0.33	0.12	0.26	0.06	23.40%	0.36	0.32
W_{REE}	155.78	52.38	105.02	23.47	22.34%	163.86	140.8
W_{LREE}	139.77	45.60	92.89	20.83	22.42%	147.92	126.37
W_{HREE}	16.02	5.87	12.13	2.76	22.77%	15.94	14.43

有研究表明,由于风化作用的影响,在土壤的形成过程中轻重稀土元素会发生不同程度的迁移,其中重稀土元素容易形成重碳酸盐和有机络合物然后随着淋溶作用被淋失,轻稀土元素则更容易被黏土所吸附产生聚集,从而导致轻稀土元素富集,重稀土元素亏损的趋势.研究区土壤亦存在轻稀土元素富集,重稀土元素亏损的特征,与前人的研究成果相同^[14-15].另外,14种稀土元素的变异系数大小相近,均为中度变异,说明研究区稀土元素来源可能一致,且在一定程度上受到人类活动的影响.

为进一步了解研究区土壤中稀土元素的分布特征,采用反距离权重法分别对各样品点 W_{REE} 、 W_{LREE} 和 W_{HREE} 进行空间插值分析,分别得到其空间分布图(图 2).

图 2 研究区 W_{REE} (a)、 W_{LREE} (b)和 W_{HREE} (c)空间分布Fig.2 Spatial distribution of W_{REE} (a), W_{LREE} (b) and W_{HREE} (c) in the study area

由图 2 可知, W_{REE} 、 W_{LREE} 和 W_{HREE} 的最高值均位于研究区东南部, 大体上呈现出南高北低的趋势, 说明稀土元素在研究区南部较为富集, 而在最北部也存在有稀土元素富集的区域, 与北部其他区域相异, 是因为最北部已超出工业园区范围, 故存在不同的特性. 另外, W_{LREE} 和 W_{REE} 的空间分布更为接近, 说明二者之间的相关性强于 W_{HREE} 和 W_{REE} 之间的相关性.

2.2 稀土元素配分模式

基于 Boynton 等^[16] 球粒陨石标准值, 对研究区土壤稀土元素的含量进行标准化, 并基于标准化值得到研究区土壤稀土元素球粒陨石标准化分配曲线, 并与中国土壤^[13]、大陆上地壳^[17] 和北美页岩^[18] 相比, 结果如图 3 所示. 图 3 结果显示了研究区土壤样品球粒陨石标准化分配曲线均向右倾斜的特点, 与中国土壤、大陆上地壳和北美页岩基本一致, 说明研究区土壤稀土元素与其具有相同的特征, 存在陆源属性的来源. 另外, 研究区土壤样品稀土元素标准化值大多数低于中国土壤、大陆上地壳和北美页岩, 说明研究区土壤稀土元素总体上并不富集.

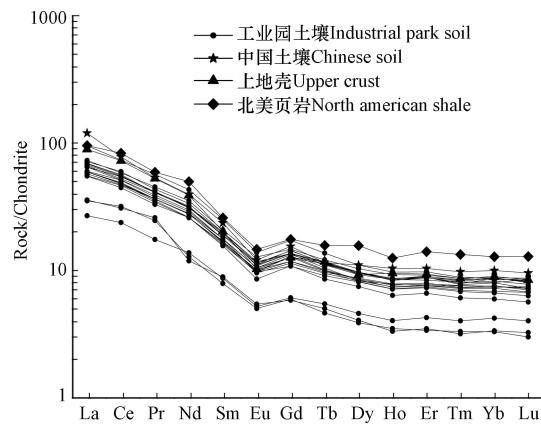


图 3 稀土元素球粒陨石标准化分配曲线

Fig.3 Standardized distribution curve of rare earth elements in chondrite meteorites

研究区土壤稀土元素特征参数如表 2、图 4 所示. 从表 2 可知, 研究区土壤 δCe 范围为 1.00—1.09, 平均值 1.04, 均大于等于 1, 说明 Ce 存在轻微的正异常, δEu 范围为 0.65—0.76, 平均值 0.71, 均小于 1, 说明 Eu 存在一定的负异常, 一般认为 Eu 异常是由原岩继承而来的, 而陆相岩具有 Eu 负异常的特点^[19]. 此外, Eu、Ce 在自然界中通常以不同的价态存在, 在土壤环境改变时易发生氧化还原反应, 从而产生分异. 当土壤中的湿度和酸度产生变化后, Ce^{3+} 易被氧化, 发生水解而富集, 使得 Ce 呈现出正异常, 而 Eu^{3+} 会被淋溶到还原环境的土壤深层从而进一步被淋失, 使得 Eu 呈现出负异常^[20].

表 2 研究区土壤稀土元素特征参数

Table 2 Characteristic parameters of soil rare earth elements in the study area

	$W_{\text{LREE}}/W_{\text{HREE}}$	δCe	δEu	$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$
最大值	9.48	1.09	0.76	10.01	4.24	1.92
最小值	6.74	1.00	0.65	5.96	2.98	1.41
平均值	7.72	1.04	0.71	7.86	3.42	1.65

注: $\delta\text{Ce}=(\text{Ce})_{\text{N}}/[(\text{La})_{\text{N}}*(\text{Pr})_{\text{N}}]^{1/2}$, $\delta\text{Eu}=(\text{Eu})_{\text{N}}/[(\text{Sm})_{\text{N}}*(\text{Nd})_{\text{N}}]^{1/2}$, 其中 $(\text{Ce})_{\text{N}}$ 、 $(\text{La})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Pr})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Eu})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Sm})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Nd})_{\text{N}}$ 为球粒陨石标准化值, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 代表球粒陨石标准化值的运算.

Note: $\delta\text{Ce}=(\text{Ce})_{\text{N}}/[(\text{La})_{\text{N}}*(\text{Pr})_{\text{N}}]^{1/2}$, $\delta\text{Eu}=(\text{Eu})_{\text{N}}/[(\text{Sm})_{\text{N}}*(\text{Nd})_{\text{N}}]^{1/2}$, $(\text{Ce})_{\text{N}}$ 、 $(\text{La})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Pr})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Eu})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Sm})_{\text{N}}$ and $(\text{Nd})_{\text{N}}$ are chondrite standardized values, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ represent operations of standardized values for chondrites.

$W_{\text{LREE}}/W_{\text{HREE}}$ 范围为 6.78—9.48, 平均值 7.72, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 范围为 5.96—10.01, 平均值 7.86, 说明轻稀土元素相对富集, 且轻重稀土元素之间存在明显的分异, 另外 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 范围为 2.98—4.24, 平均值 3.42, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 范围为 1.41—1.92, 平均值 1.65, 说明轻稀土元素存在明显的分馏, 而重稀土元素分馏情况并不明显.

结合图 4 可知, δCe 最大值在 TY019 处, 达到 1.09, 正异常程度最高, 说明在该点所在区域 Ce 相对富集, δEu 最小值在 TY009 处, 达到 0.65, 负异常程度显著, 说明在该点所在区域 Eu 较为亏损. 代表轻

重稀土分异程度的 $(La/Yb)_N$, 其变化趋势与 W_{LREE}/W_{HREE} 的变化趋势相同, 其中 W_{LREE}/W_{HREE} 平均值为7.72, $(La/Yb)_N$ 平均值为7.86, 说明轻重稀土元素分异显著, 且轻稀土元素相对富集. $(La/Sm)_N$ 最大值在TY015处, 达到4.24, 说明在该点所在区域轻稀土元素分馏最为显著, $(La/Sm)_N$ 最大值在TY007处, 达到1.92, 说明在该点所在区域重稀土元素分馏最为明显.

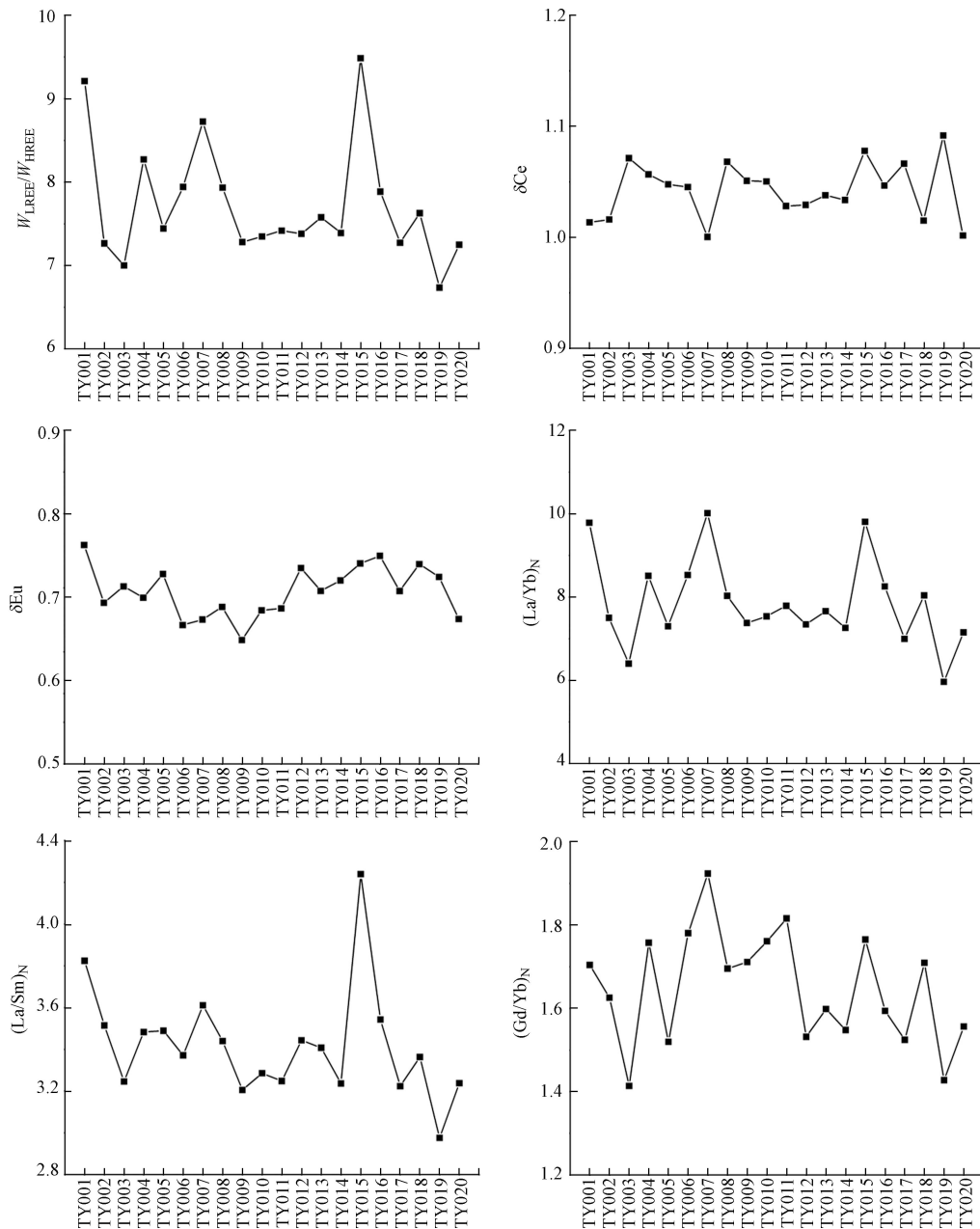


图4 研究区土壤稀土元素特征参数分布

Fig.4 Distribution of soil characteristic parameters of rare earth elements in the study area

2.3 稀土元素影响因素

土壤是成土母质在特定的气候和生物条件下风化形成的产物, 研究表明土壤中的各种元素主要来自于成土母质, 成土母质是土壤中各种元素的初始来源, 其中也包括稀土元素, 但不同的稀土元素物理和化学性质不可能完全相同, 在成土过程中受到这些差异的影响, 会导致其在相对含量上发生变化, 最终形成稀土元素的分馏^[21-22], 而在成土后受到工业生产、农业种植等人类活动的影响, 又会致使土壤中稀土元素的相对含量发生改变. 因此, 土壤中稀土元素的含量会受到自然因素和人类活动的不同影响.

2.3.1 自然因素

在未受到人类活动的影响之前, 土壤中稀土元素的含量和特征与成土母质的类型和特征密切相

关^[23]. 研究区地处西宁盆地, 主要存在西宁群及贵德群形成的沉积岩, 且研究区地层主要来自于第三系, 是典型的陆相沉积地层. 沉积岩 δEu 平均值为 0.68, 与研究区土壤稀土元素 δEu 平均值(0.71)接近; 沉积岩 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 8.26, 与研究区土壤稀土元素 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 平均值(7.86)相差不大, 因此, 认为研究区土壤中稀土元素的含量主要受盆地内沉积岩的影响.

土壤中稀土元素的含量亦会受到风化作用的影响, 由于重稀土元素在风化作用的影响下会优先发生迁移, 而轻稀土元素则会被黏土吸附产生聚集, 最终导致轻重稀土元素的比值随着风化程度的增加而增大^[24-26]. 研究区土壤 $W_{\text{LREE}}/W_{\text{HREE}}$ 平均值为 7.72, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 平均值为 7.86, 轻重稀土元素分异显著, 说明研究区土壤中稀土元素的含量变化受到一定的化学风化活动的影响. 同时研究区存在的角闪石、磷灰石等重矿物和蒙脱石、绿泥石等黏土矿物对轻稀土元素存在吸附作用, 这一系列作用共同导致了轻稀土元素的富集.

2.3.2 人类活动

通过表 1 可知, 研究区土壤稀土元素含量的变异系数均在 20% 以上, 达到了中等程度的变异, 说明可能受到一定人类活动的影响. 通过对研究区土壤稀土元素含量进行 Person 相关分析, 查明 14 种稀土元素之间的相关性, 结果如表 3 所示. 相关分析结果表明, 14 种稀土元素之间的相关性均在 0.85 以上, 两两之间呈显著正相关关系 ($P < 0.01$), 说明在同一区域中土壤稀土元素可能受到相同的人类活动影响.

表 3 稀土元素相关分析结果 ($P < 0.01$)

Table 3 Results of correlation analysis of rare earth elements ($P < 0.01$)

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
La	1													
Ce	0.995	1												
Pr	0.992	0.991	1											
Nd	0.979	0.977	0.964	1										
Sm	0.976	0.974	0.965	0.993	1									
Eu	0.967	0.968	0.957	0.985	0.987	1								
Gd	0.960	0.963	0.952	0.989	0.989	0.979	1							
Tb	0.945	0.949	0.935	0.979	0.983	0.986	0.985	1						
Dy	0.920	0.923	0.907	0.965	0.967	0.976	0.969	0.991	1					
Ho	0.925	0.928	0.908	0.967	0.968	0.979	0.972	0.990	0.995	1				
Er	0.903	0.909	0.888	0.954	0.958	0.969	0.963	0.987	0.997	0.995	1			
Tm	0.892	0.899	0.871	0.943	0.950	0.963	0.955	0.981	0.988	0.993	0.990	1		
Yb	0.868	0.876	0.850	0.920	0.931	0.944	0.935	0.972	0.981	0.983	0.989	0.989	1	
Lu	0.875	0.875	0.858	0.923	0.934	0.944	0.938	0.969	0.974	0.983	0.978	0.987	0.984	1

通过分研究区土壤稀土元素空间分布特征(图 2), 并结合实地情况可进一步揭示研究区土壤稀土元素的影响因素. 土壤稀土元素空间分布显示研究区南部是稀土元素的主要富集区域, 通过实地考察, 发现研究区南部为工厂和人类生活的主要聚居区, 而在北部, 工厂和人类生活的痕迹明显减少. 工厂的生产活动和人类生活均会产生一定量的稀土元素, 然后通过各种途径渗透进入土壤, 导致土壤中的稀土元素进一步富集, 可能是造成研究区土壤中的稀土元素含量空间分布南高北低的主要因素.

3 结论(Conclusion)

(1) 稀土元素总含量 (W_{REE}) 范围为 52.38—155.78 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 105.02 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中平均值低于背景值, 最大值介于青海省土壤背景值与中国土壤背景值之间, 轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对亏损. 空间分布特征显示 W_{REE} 、 W_{LREE} 和 W_{HREE} 的最高值均位于研究区东南部, 大体上呈现出南

高北低的趋势。

(2)研究区土壤稀土元素配分模式与中国土壤、大陆上地壳和北美页岩基本一致,所有样点均表现出右倾状态,Ce存在轻微的正异常,Eu存在一定的负异常,轻重稀土元素显著分异,轻稀土元素存在明显的分馏,重稀土元素分馏程度较低。

(3)研究区土壤中稀土元素受自然因素和人类活动的双重影响。研究区的成土母质是影响其含量的主要因素,化学风化活动和矿物导致了轻重稀土元素的分异,而研究区存在的工厂生产活动和人类生活聚居区亦会有稀土元素的产生进入土壤,使得研究区稀土元素的空间分布整体呈现南高北低的特点。

参考文献 (References)

- [1] 林卓玲,黄光庆.土壤稀土元素的迁移-富集机制及其生态效应[J].地球环境学报,2023,14(5):521-538.
LIN Z L, HUANG G Q. Migration enrichment mechanism and ecological effects of rare earth elements in soil[J]. *Journal of Earth Environment*, 2023, 14(5): 521-538 (in Chinese).
- [2] ZHANG Q, HAN G, LIU M, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements in soils from puding karst critical zone observatory, Southwest China[J]. *Sustainability*, 2019, 11(18): 4963.
- [3] 关海波,李金霞,牟艳军,等.白云鄂博矿区外围土壤稀土元素累积空间分异[J].稀土,2021,42(5):27-35.
GUAN H B, LI J X, MOU Y J, et al. Spatial heterogeneity of rare earth elements accumulation in the soil surrounding bayan obo mining area[J]. *Chinese Rare Earths*, 2021, 42(5): 27-35 (in Chinese).
- [4] 王学锋,许春雪,顾雪,等.典型稀土矿区周边土壤中稀土元素含量及赋存形态研究[J].岩矿测试,2019,38(2):137-146.
WANG X F, XU C X, GU X, et al. Concentration and fractionation of rare earth elements in soils surrounding rare earth ore area[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2019, 38(2): 137-146 (in Chinese).
- [5] 冉勇,刘铮.我国主要土壤中稀土元素的含量和分布[J].中国稀土学报,1994,12(3):248-252.
RAN Y, LIU Z. Content and distribution of REE in main soil in China[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 1994, 12(3): 248-252 (in Chinese).
- [6] WANG L, LIANG T. Geochemical fractions of rare earth elements in soil around a mine tailing in Baotou, China[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 12483.
- [7] 杨洁,张娅璐,宿宝巍,等.长江下游冲积平原区土壤稀土元素富集与分馏特征[J].环境化学,2023,42(10):3301-3309.
YANG J, ZHANG Y L, SU B W, et al. Enrichment and fractionation of rare earth elements in alluvial plain soils at the lower reaches of the Yangtze River[J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(10): 3301-3309 (in Chinese).
- [8] 王玉洁,刘蓓蓓,万全,等.稀土元素在土壤中的释放与迁移研究进展[J].生态环境学报,2021,30(3):644-654.
WANG Y J, LIU B B, WAN Q, et al. The release and transport behavior of rare earth elements in soil: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(3): 644-654 (in Chinese).
- [9] SILVA C M C A C, BARBOSA R S, NASCIMENTO C W A, et al. Geochemistry and spatial variability of rare earth elements in soils under different geological and climate patterns of the Brazilian Northeast[J]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2018, 42: 8.
- [10] 杜贯新,闫百泉,孙雨,等.松嫩平原黑土区西北部阿荣旗地下黑土稀土元素特征及环境指示[J].现代地质,2023,37(3):813-820.
DU G X, YAN B Q, SUN Y, et al. REE geochemistry and its environmental significance of subsurface black soil from northwestern Arongqi, Songnen plain black soil district[J]. *Geoscience*, 2023, 37(3): 813-820 (in Chinese).
- [11] HAN G, SONG Z, TANG Y. Geochemistry of rare earth elements in soils under different land uses in a typical karst area, Guizhou Province, Southwest China[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2017, 97(4): 606-612.
- [12] 中华人民共和国环境保护部.土壤和沉积物 金属元素总量的消解 微波消解法:HJ 832-2017[S].北京:中国环境科学出版社,2017.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Soil and sediment-Digestion of total metal elements-Microwave assisted acid digestion method: HJ 832-2017[S]. Beijing: China Environment Science Press, 2017 (in Chinese).
- [13] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990.
China National Environmental Monitoring Centre. Background value of soil elements in China[M]. Beijing: China Environment Science Press, 1990 (in Chinese).
- [14] 马倩怡,陈志强,陈志彪,等.南方红壤侵蚀流域水稻田中稀土元素的迁移累积特征[J].环境科学学报,2018,38(3):1172-1178.
MA Q Y, CHEN Z Q, CHEN Z B, et al. Migration and accumulation characteristics of rare earth elements in paddy field of red soil erosion area in South China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(3): 1172-1178 (in Chinese).

- [15] 徐双贵, 杨莎, 胡婷婷, 等. 湟水河西宁段表层沉积物稀土元素地球化学特征及其物源分析 [J]. 中国稀土学报, 2022, 40(4): 711-720.
XU S G, YANG S, HU T T, et al. Geochemical characteristics and provenance analysis of REE in surface sediments from Xining section of Huangshui River[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2022, 40(4): 711-720 (in Chinese).
- [16] BOYNTON W V. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies[M]. Edited by Henderson P. Rare Elements Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984.
- [17] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Rev. Geophy.*, 1995, 33(2): 241.
- [18] EYRING L, GSCHNEIDNER K A, LANDER G H. Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths[M]. Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1979.
- [19] 张智印, 刘雪松, 魏建朋, 等. 宁都盆地典型脐橙园土壤稀土元素地球化学特征研究 [J]. 中国稀土学报, 2022, 40(3): 523-532.
ZHANG Z Y, LIU X S, WEI J P, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements in soil of typical navel orange orchard in Ningdu Basin[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2022, 40(3): 523-532 (in Chinese).
- [20] 张倩, 韩贵琳. 九龙江流域土壤稀土元素分布特征及控制因素 [J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(7): 1494-1502.
ZHANG Q, HAN G L. Distribution and controlling factors of soil rare earth elements in Jiulongjiang River catchment[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(7): 1494-1502 (in Chinese).
- [21] 郝秀平, 赵述华, 杨坤, 等. 深圳土壤稀土元素的背景含量和影响因素研究 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(5): 2362-2373.
XI X P, ZHAO S H, YANG K, et al. The background concentration of rare earth element and its impact factor in soil of Shenzhen City[J]. China Environmental Science, 2021, 41(5): 2362-2373 (in Chinese).
- [22] 雷成琦, 钟山, 张漓杉, 等. 浙江某垃圾焚烧厂周边土壤中稀土元素分布特征及潜在生态风险评价 [J]. 环境化学, 2022, 41(5): 1629-1638.
LEI C Q, ZHONG S, ZHANG L S, et al. Spatial distribution and potential ecological risk assessment of rare earth elements in soil surrounding a waste incineration plant in Zhejiang[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(5): 1629-1638 (in Chinese).
- [23] 黄成敏, 王成善. 风化成土过程中稀土元素地球化学特征 [J]. 稀土, 2002(5): 46-49.
HUANG C M, WANG C S. Geochemical features of rare earth elements in process of rock weathering and soil formation[J]. *Chinese Rare Earths*, 2002(5): 46-49 (in Chinese).
- [24] 王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 等. 中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义 [J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2071-2080.
WANG Z W, LIU Y M, WANG Z L, et al. Distribution and environmental significance of rare earth elements in typical protected vegetable soil, northern China[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 2071-2080 (in Chinese).
- [25] 李景瑞, 刘升发, 冯秀丽, 等. 孟加拉湾中部表层沉积物稀土元素特征及其物源指示意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(4): 41.
LI J R, LIU S F, FENG X L, et al. Rare earth element geochemistry of surface sediments in midbengal bay and implications for provenance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(4): 41 (in Chinese).
- [26] 刘永林, 雒昆利, 袁余洋. 重庆市江津区表层土壤中稀土元素含量与分布特征 [J]. 中国稀土学报, 2020, 38(2): 215-224.
LIU Y L, LUO K L, YUAN Y Y. Content and spatial distribution characteristics of rare earth of surface soil in Jiangjin District, Chongqing City[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2020, 38(2): 215-224 (in Chinese).