

贵州省茅台地区土壤中稀土元素含量 及空间分布规律研究

姜涛^{1,2}, 陈武³, 肖唐付¹, 宁增平¹, 贾彦龙^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 贵州地质调查院, 贵阳 550004)

摘要:采集了茅台地区的116个表层土壤样品,用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析了稀土元素(REE)含量。利用地统计学和空间分析等方法,对稀土元素(REE)含量、分异特征、空间分布规律等进行分析和探讨。研究结果表明,研究区表层土壤 Σ REE平均含量为287.1 $\mu\text{g/g}$,高于中国大陆土壤(186.8 $\mu\text{g/g}$)和地壳中(207 $\mu\text{g/g}$)稀土元素丰度;轻稀土相对富集,轻重稀土分异程度较大;在成土过程中Ce呈现正异常,Eu呈现负异常;六种主要土壤类型稀土元素含量分异规律为:潮土>紫色土>水稻土>石灰土>黄壤>黄棕壤;研究区表层土壤稀土总含量空间分布起伏变化较大,表现为局部相对高值、低值的斑块状分布。本研究可为茅台地区地质地理环境研究提供相关参考,为茅台酒后备资源基地的合理选址提供科学依据。

关键词:土壤;稀土元素;空间分布;茅台地区

中图分类号:P595;S153 文献标识码:A 文章编号:1672-9250(2013)03-0281-07

稀土元素在自然界中含量低,化学性质相似,具有特殊的地球化学意义^[1]。对第四纪以来不同时代喷发的玄武岩、火山角砾岩上发育的土壤稀土元素研究发现,稀土元素总量可作为衡量土壤发育程度的良好指标;宋云华和沈丽璞^[2]提出La/Ce值的变化可反映岩石风化程度,刘英俊等^[3]也提出La/Nd、Ce/Nd值变化规律对于风化作用的形成和发生条件具有指示意义。稀土元素在一定条件下能够促进植物对养分的吸收、转化和利用,对植物生理生化反应具有“激活、类激素”的作用^[4],如适量的氯化钼对植物的生长和产量都有促进作用,钼可提高小麦种子的出苗率^[5,6]。因此,深入研究土壤中稀土元素含量和空间分布特征具有重要的地球化学意义和环境意义。

贵州省茅台地区既是国酒茅台的生产基地,又是茅台酒酿造原料(高粱)的种植基地,茅台酒的良好品质对其原产地地质地理环境的依赖性大。杨立铮等^[7]研究认为茅台酒酿造原料(高粱)的品质与种植土壤中的部分微量元素有密切的相关性。稀土元

素不仅能够提高高粱等农作物的产量和果实品质,在酿酒过程中还有助于缩短酒精发酵周期,提高出酒率及总酯、总酸的量^[8-12]。因此,深入研究茅台地区土壤稀土元素含量及分布特征,对茅台酒的可持续发展、原生产基地的建设以及潜在后备资源基地分布区域的圈定具有重要意义。但迄今有关茅台地区土壤稀土元素含量和分布特征的系统研究还未见报道。为此,本文选择茅台地区为研究区,采用地统计学的分析方法,从稀土元素含量、分异特征、空间分布规律等角度,对研究区表层土壤稀土元素进行了深入系统地分析和探讨,旨在了解研究区表层土壤稀土元素的分布规律,为研究区地质地理环境研究提供相关参考,茅台酒后备资源基地的合理选址提供科学依据。

1 研究区概况

研究区(106°21'30"~106°23'00"E,27°51'00"~27°52'00"N)位于长江水系上游赤水河右岸的茅台镇城区和上游的赵家坝区域,面积约60 km²,行政

收稿日期:2012-10-22;改回日期:2012-12-19

基金项目:贵州茅台科技联合基金[2009]70052。

第一作者简介:姜涛(1983—),女,博士研究生,主要从事环境科学研究。E-mail: taojzw@163.com.

区划属于贵州省仁怀市茅台镇(图1),茅台镇是驰名中外的国酒之乡,被誉为“中国第一酒镇”。研究区海拔390~1432 m,年均气温18.5℃,年平均降雨量1000 mm左右,年日照时数1400 h,年平均相对湿度78%,属亚热带湿润季风气候。研究区内发育的主要土壤类型有紫色土、黄棕壤、石灰土、潮土、水稻土和黄壤。其中,紫色土分布广泛,是茅台酒酿造所用窖泥的主要原材料。

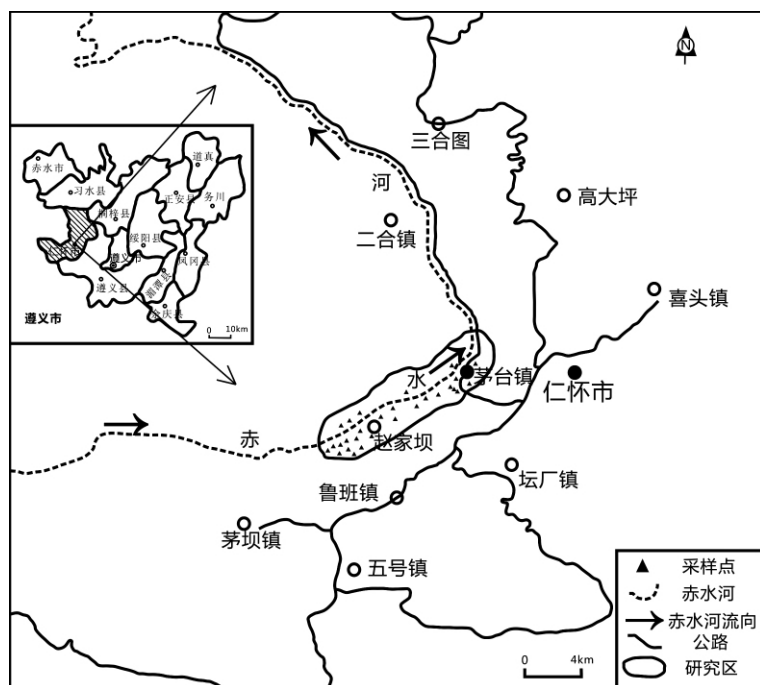


图1 研究区区域及采样点位置图

Fig. 1 Map showing the study area and the sampling sites

2 材料与方法

2.1 样品采集

采样点集中在茅台镇和赵家坝区域(图1),共采集土壤样品116件(表层0~20 cm),每个样点采集2~3个子样品充分混合组合成一个代表性样品。样品装于样品袋中,带回实验室。

2.2 测定方法

土壤样品室温下自然风干,经分选粉碎过筛至 ≤ 200 目密封保存。用 $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ 混合酸高温高压密闭法消解样品,在中国科学院地球化学研究所进行电感耦合等离子体质谱仪(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry; ELANDRC-e, Perkin Elmer, USA)测试。实验中使用的试剂均为优级纯,所用水均为Milli-Q超纯水。通过标样(GSS11)、内标($500 \mu\text{g/L Rh}$)、重复样和空白样进

行样品测试质量控制,分析结果误差在95%置信水平上均控制在10%以内。

2.3 数据处理

地统计学研究对象是区域化变量,区域化变量既有随机性,又有结构性。能够同时描述区域化变量这种性质的工具是变异函数。变异函数可以定义为区域化变量在抽样间隔下样本方差的数学期望,变异函数也称为半方差函数^[13,14]。半方差函数的计算、理论模型的拟合及克里金插值和图形绘制由GS+和ArcGIS软件共同完成。其他数据整理和统计分析采用Microsoft Excel和SPSS软件完成。

3 结果与讨论

3.1 研究区表层土壤中稀土元素含量分析

研究区116个土壤样品稀土元素含量测定结果表明,土壤样品中稀土元素总量的分布范围为 $130.8 \sim 549.4 \mu\text{g/g}$,平均 $287.1 \mu\text{g/g}$,变异系数27.8%,高于中国大陆土壤和地壳中稀土元素丰度($186.8 \mu\text{g/g}$ 、 $207 \mu\text{g/g}$)^[15]。造成该地区稀土元素含量偏高的原因,一方面是由于研究区属中亚热带季风气候,地处低热河谷地带,高温多雨,生物活动旺盛,岩石风化和土壤成土过程强烈,易溶元素淋失较严重,铁、铝、稀土等难溶元

素相对富集^[16];另一方面是在表生作用过程中,稀土元素可被氢氧化铁胶体及粘土矿物吸附,从而导致该区域稀土元素含量偏高。

研究区表层土壤稀土元素平均含量由高到低依次为 $\text{Ce} > \text{La} > \text{Nd} > \text{Pr} > \text{Sm} > \text{Eu} > \text{Gd} > \text{Tb} > \text{Dy} > \text{Ho} > \text{Er} > \text{Tm} > \text{Yb} > \text{Lu}$,遵循奥多-哈金斯规则^[17],即原子序数为偶数的稀土元素含量均高于相邻的2个原子序数为奇数的元素含量;且随原子序数增大元素丰度依次下降,即轻稀土平均含量大于重稀土含量。

与中国土壤稀土元素含量比较(图2),研究区表层土壤Ce元素含量明显偏高,是该区域总稀土平均含量偏高的主要贡献者,而其余单稀土元素平均含量基本与中国土壤稀土平均含量相当。这是由于研究区土壤来源于多种岩石风化物,并在沉积-搬运-沉积过程中使其母质成分在自然营力作用下经

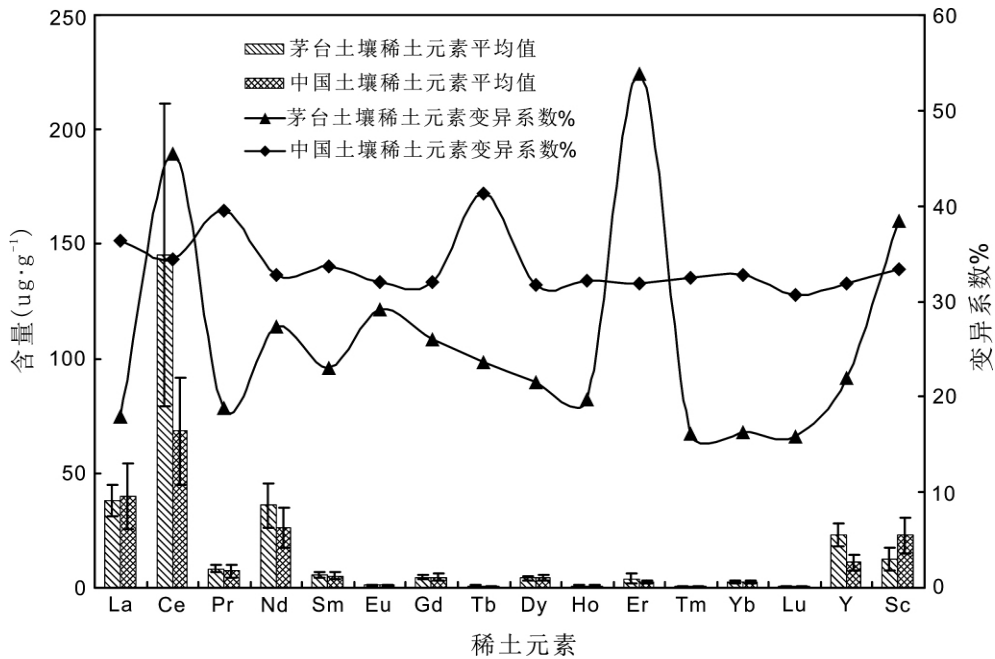


图 2 研究区表层土壤稀土元素平均含量及变异系数
Fig. 2 Average content and CV of REE in soil of Maotai

过了高度的均匀混合造成的^[18]。从变异系数看,研究区表层土壤稀土元素除 Ce、Er、Sc 外均小于全国土壤稀土元素变异系数(30%~40%)。这说明研究区土壤具有同源性及质地均匀的特征。而研究区内表层土壤 Ce、Er、Sc 含量波动范围较大,排除分析误差,这种差异是成土母质、成土作用、生物气候环境、人类活动、土壤类型及地域因素综合影响的结果^[18]。

3.2 研究区表层土壤稀土元素分异特征

3.2.1 REE 配分模式

研究区土壤样品中的稀土元素含量以球粒陨石中对应含量标准化后,获得土壤样品中稀土元素的配分模式(不包括 Y、Sc),如图 3 所示。研究区表层土壤中的稀土元素分布模式为向右倾的富轻稀土 Eu 亏损模式,与中国土壤稀土元素分布模式相近。但研究区表层土壤稀土元素含量明显高于全国土壤稀土元素含量。标准化曲线在 Eu 处表现为“凹陷”,呈现亏损状态,而 Ce 和 Er 处表现为“凸出”,呈富集状态。

研究区表层土壤出现 Eu 亏损,一方面是由于研究区内土壤成土母岩本身就存在 Eu 亏损。风化壳和土壤中各种元素主要来自成土母质,成土母质决定着土壤中化学元素的初始含量^[19,20]。这也是研究区内不同土壤类型稀土元素含量存在差异的主要原因。另一方面, Eu 是变价元素(Eu^{3+} 、 Eu^{2+}),在研究区内特殊的自然地理条件下, Eu 发生氧化还

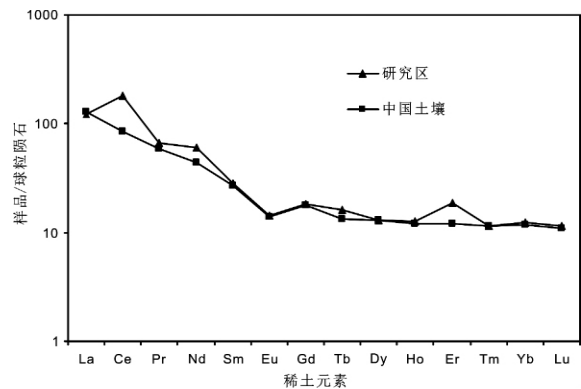


图 3 表层土壤球粒陨石标准化稀土元素配分模式
Fig. 3 Chondrite-normalized REE distribution patterns of surface soils

原反应,使 Eu^{3+} 被还原形成 Eu^{2+} 而淋失,从而导致土壤中 Eu 的亏损^[21],而且这种亏损是在成土母岩 Eu 亏损的基础上发生的 Eu 亏损的叠加。Ce 呈现正异常的原因除了与研究区内成土母质及基岩的关系外,也与其自身性质有关。由于土壤表层酸性较强,土壤中大部分稀土元素的淋溶迁移能力增加,但 Ce 在此条件下,却容易被氧化和水解,生成溶解度很低的 Ce 的高价态水合物沉淀,从而导致 Ce 在土壤表层中富集^[22]。

3.2.2 REE 分异

由于氧化还原性能、水解反应常数、配合物的稳定常数、吸附能力等物理化学性质存在差别,稀土元

素在成土过程中受到 pH 值、温度、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,导致其相对丰度发生改变,从而产生了稀土元素的分异^[23]。

研究区表层土壤稀土元素分异特征分析结果(表 1)表明,轻、重稀土元素的比值($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$)为 5.69,远大于 1,其值说明研究区稀土总量中轻稀土元素占优势,轻稀土相对富集,且轻重稀土元素分异度较大,高于中国土壤轻重稀土元素分馏程度(5.47)^[15]。这一现象是由稀土元素的地球化学性质和研究区内自然地理条件造成的^[16]。研究区处于中亚热带季风气候区,化学风化作用与淋溶作用较强,成土母质在风化过程中,重稀土元素形成络合物的能力强于轻稀土,而轻稀土离子被土壤胶体吸附的能力又大于重稀土,导致重稀土易被淋失而轻稀土易被积淀,从而出现轻稀土相对富集、重稀土亏损现象^[24]。研究区内土壤发育过程中轻、重稀土元素发生显著分异也导致了 $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ 值与 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值较大。

表 1 研究区表层土壤稀土元素分异特征
Table 1 Fractional characteristics of REEs
in surface soil of Maotai

$\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	$(\text{La}/\text{Sm})_N$	$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$	δCe	δEu	$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$
6.24	9.91	4.33	1.46	1.98	0.64	5.69

$(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值和 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值反映轻重稀土内部的分馏程度。 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值为 4.33,轻稀土分馏明显, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值为 1.46,说明重稀土的分馏程度偏低。研究区表层土壤成土过程中 Ce 表现为相对富集状态(δCe 值大于 1.05),呈现正异常,而 Eu 表现为相对亏损状态(δEu 值小于 0.95),呈现负异常。铈在自然界有两种存在形式: Ce^{3+} 和 Ce^{4+} ,Ce 正异常是因为 Ce^{3+} 氧化为 Ce^{4+} ^[25]。茅台地区的地质地貌结构主要是侏罗系和白垩系紫色砂页岩、砾岩,形成时间在 7000 年以上,土壤受海拔高度和气候影响,酸碱适度,土质松软,孔隙度大,具有良好的渗透性,再加上自然降雨,稀土元素与其他可溶性物质一样,受到淋溶向下运移。但 Ce^{4+} 较其他的 LREE 有较高的离子电势,相应的有较低的流动性,不随其他 LREE 向下运移,使得研究区表层土壤中出现 Ce 正异常。一般情况下铈呈 Eu^{3+} 存在,与 REE^{3+} 性质相似,共同迁移,不会出现 Eu 异常。在还原条件下,部分 Eu^{3+} 还原为 Eu^{2+} ,其碱性度于

REE^{3+} 差别较大而发生分离^[21]。另外,研究区表层土壤呈现 Eu 负异常,这可能继承了基性原岩的特性。

3.2.3 不同土壤类型分异规律

受地域环境、成土母质等因素的影响,不同土壤类型的稀土元素含量也存在较为明显的分异现象。研究对比分析了研究区六种主要土壤类型(紫色土、黄棕壤、石灰土、水稻土、潮土、黄壤)的稀土元素含量特征。分析结果(表 2)表明,六种主要土壤类型稀土元素含量主要表现为三种分异模式,即:

(1)元素 Sc、Y、La、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho 的含量基本呈现潮土、紫色土、水稻土 > 石灰土 > 黄棕壤、黄壤的分异规律。

(2)元素 Ce 的含量呈潮土 > 黄壤 > 紫色土 > 黄棕壤 > 石灰土 > 水稻土的分异规律。

(3)元素 Er、Tm、Yb、Lu 在各个土类中的含量没有明显差异。

总体来看,研究区六种主要土壤类型稀土元素含量分异规律为:潮土 > 紫色土 > 水稻土 > 石灰土 > 黄壤 > 黄棕壤,标准化曲线分布模式一致。造成该地区不同土壤类型稀土元素含量存在差异的主要原因是研究区内不同地层沉积环境的成土母岩的化学组成不同^[19,20]。如石灰土中稀土元素含量主要受其成土母质的化学风化方式影响。付舜珍等^[26]对贵州省典型土壤中稀土元素含量及分布特征研究结果表明,贵州省石灰岩母质富含稀土,从而导致石灰土稀土元素含量相对较高。同时,水热状况、海拔高度、土壤风化程度、人类活动等也会造成不同土壤类型稀土元素分异。如研究区内黄壤和黄棕壤是处于海拔相对较高的地带性土壤,其水热条件相对较差,土壤风化强度小,稀土元素含量相对较低^[26]。而水稻土多是由黄壤、黄棕壤经水耕熟化和旱耕熟化交替影响下形成的^[27],再加上人为活动的影响,其熟化程度远大于黄壤、黄棕壤。此外,水稻土耕层较厚,随耕层厚度的增加,土壤养分贮量递增,加剧了水稻土理化生物性质的变化,物质的活化和迁移。因此,研究区内水稻土中稀土元素含量高于黄壤等土壤。潮土则是一种半水成非地带性且具有腐殖质层(耕作层)、氧化还原层及母质层等剖面构型的土壤。研究区内潮土是主要耕作土,长期耕作使用农肥、作物根系多等促使该地区潮土稀土元素富集。潮土中晶质氧化铁与稀土元素的结合作用较强,也使得稀土元素在潮土中相对富集^[28]。

表 2 研究区不同土壤类型中 REE 平均含量

Table 2 Average contents of REE in main type of soils from Maotai

元素	紫色土		黄棕壤		石灰土		水稻土		潮土		黄壤	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
La	38.3	5.67	36.6	10.6	36.4	8.01	38.7	1.84	44.5	4.46	34.5	7.65
Ce	149.6	92.5	145.9	70.8	143.9	78.5	126.3	65	188.1	56.9	154.9	44.6
Pr	8.38	1.36	7.67	2.07	7.86	1.74	9.01	0.11	10.5	1.38	7.21	1.28
Nd	38.2	23.7	31.3	9.45	36.3	11.7	46.2	19.5	47.7	9.46	37.2	9.67
Sm	5.75	1.20	4.85	1.37	5.31	1.34	5.74	0.94	7.2	0.87	4.43	0.79
Eu	1.12	0.29	0.91	0.34	1.08	0.34	1.1	0.32	1.46	0.07	0.8	0.12
Gd	4.92	1.32	4.06	1.37	4.71	1.50	4.72	0.9	6.12	0.38	3.95	0.67
Tb	0.81	0.20	0.65	0.18	0.76	0.19	0.81	0.14	0.91	0.07	0.63	0.10
Dy	4.39	0.93	3.59	0.91	4.19	0.99	4.03	1.11	4.68	0.30	3.56	0.61
Ho	0.96	0.19	0.80	0.19	0.93	0.20	0.90	0.21	0.98	0.06	0.81	0.13
Er	4.33	4.74	3.11	1.45	4.46	2.67	5.35	3.40	4.40	1.65	5.07	2.43
Tm	0.39	0.07	0.33	0.08	0.38	0.07	0.36	0.08	0.37	0.02	0.35	0.05
Yb	2.67	0.42	2.33	0.51	2.60	0.49	2.44	0.44	2.57	0.18	2.47	0.30
Lu	0.39	0.06	0.34	0.07	0.38	0.08	0.36	0.05	0.37	0.03	0.37	0.04
Y	25.0	4.90	19.7	4.67	22.2	5.52	25.8	4.22	25.6	1.89	17.9	2.85
Sc	14.1	4.52	8.69	3.83	12.2	4.95	14.7	5.03	12.9	3.24	7.06	2.08
ΣREE	299.3		270.8		283.7		286.5		358.4		281.2	

注:Mean 为平均值,SD 为标准差。

3.3 研究区表层土壤稀土元素的空间变异特性分析

根据稀土元素总含量半方差函数的拟合结果,采用指数拟合模型,在约束条件下,利用采样点稀土元素数据和地面样点高程数据,采用协同克里金插值方法,绘制了研究区土壤总稀土元素含量空间分布特征(图 4)。

研究区土壤稀土元素总含量空间分布起伏变化较大,表现为局部相对高值、低值的斑块状分布。这表明即使是同一成土母质同一土壤类型,受气候、地形、地貌和生物等因素的影响,稀土元素含量也可能存在较大的差异。申家坪、田榜村、水井村等区域土壤总稀土含量相对偏高,这与区内土地利用方式、人

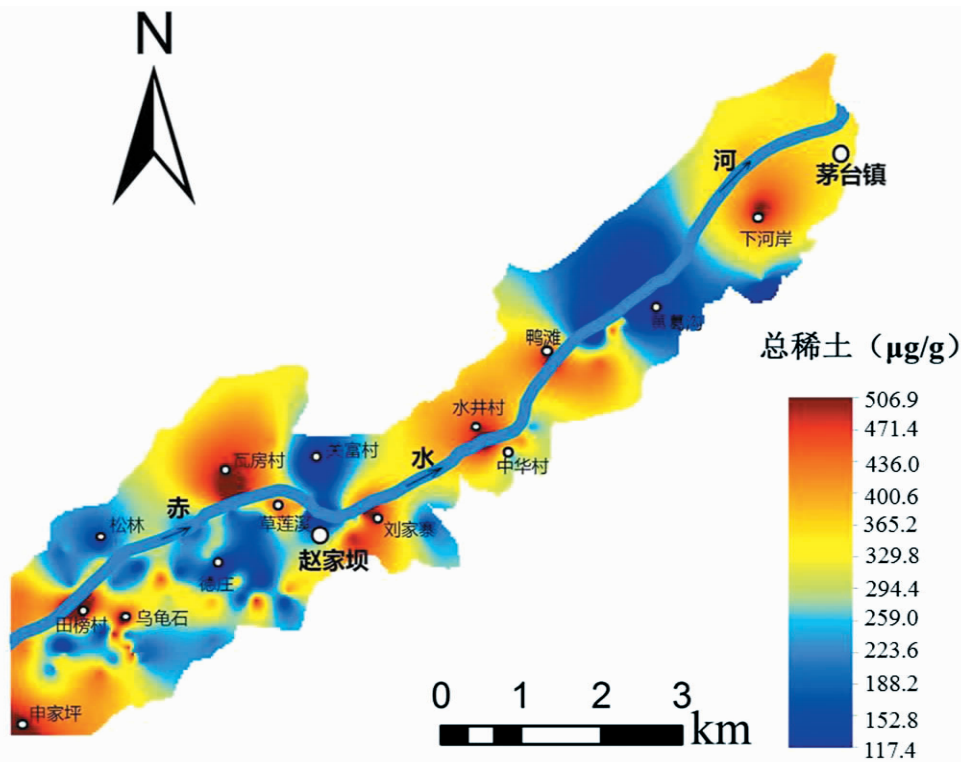


图 4 研究区土壤 ΣREE 含量空间分布图

Fig. 4 Map showing spatial distribution of soil rare-earth elements

为活动(施肥)等有关;而松林等区域土壤总稀土含量相对偏低,与该区域植被类型及受人为扰动作用较小有关。由于稀土对高粱种子的萌发指标及对高粱品质的影响都存在一个显效剂量^[29,30],而茅台地区表层土壤中高稀土对高粱产量及品质的影响还有待深入研究,所以本研究获得的表层土壤稀土元素空间分布规律可以为今后的研究工作提供基础数据资料,为合理制定高粱种植方案提供科学依据。此外,茅台酒酿造过程中所使用的窖泥也是取自该研究区内,单从稀土元素角度出发,本研究还可为窖泥的合理选取提供依据。

4 结论

研究从稀土元素含量、分异特征、空间分布规律等方面深入分析了茅台地区土壤稀土元素的含量和

分布特征,主要结论为:

1)研究区表层土壤总稀土含量高于中国土壤、地壳中稀土元素丰度,Ce是主要贡献者。

2)研究区表层土壤在发育过程中发生了明显的轻稀土富集现象,轻重稀土元素分异程度较大,大于中国土壤轻重稀土元素分异程度。轻稀土内部分馏明显,重稀土内部分馏程度偏低。在成土过程中,Ce处于相对富集状态,呈现正异常,而Eu处于相对亏损状态,呈现负异常。

3)研究区六种主要土壤类型稀土元素含量分异规律为:潮土>紫色土>水稻土>石灰土>黄壤>黄棕壤。

4)研究区表层土壤稀土元素总含量空间分布起伏变化较大,表现为局部相对高值、低值的斑块状分布。

参 考 文 献

- [1] 黄成敏, 龚子同. 土壤发育过程中稀土元素的地球化学指示意义[J]. 中国稀土学报, 2000(2): 150-155.
- [2] 宋云华, 沈丽璞. 酸性火山岩类风化壳中稀土元素的地球化学实验研究[J]. 地球化学, 2004(3): 225-234.
- [3] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 194.
- [4] 陈祖义, 朱旭东. 稀土元素日允许摄入量差异与农用安全性讨论[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(3): 93-96.
- [5] Horovitz C T. Scandium: its occurrence, chemistry, physics, metallurgy, biology, and technology[M]. Academic Press, Inc., New York, 1975: 611.
- [6] 解惠光. 中国稀土元素在农业上应用研究进展[J]. 科学通报, 1991, 36(8): 561-564.
- [7] 杨立铮, 朱赫宇, 卫迦. 茅台酒酿酒高粱的地质环境研究[J]. 地学前缘, 1996(2): 224-233.
- [8] 张传慧, 谢惠安, 孙家美. 硝酸稀土对酵母菌生长的影响[J]. 稀土, 1990(2): 57-58.
- [9] 陈浩, 刘汉兰. 稀土元素与中草药关系的探讨[J]. 广东微量元素科学, 2001, 8(3): 1-8.
- [10] Thiel G, Geisler G, Blechschmidt I, et al. Determination of trace elements in wines and classification according to their provenance[J]. Analytical and bioanalytical chemistry, 2004, 378(6): 1630-1636.
- [11] Valluzzi R, Guertin R P, Haas T E. Magnetically complexed collagen nanocomposites[J]. Philosophical magazine, 2004, 84(32): 3439-3447.
- [12] 温守钦, 朱恩静, 金成洙, 等. 南果梨生长体系中的稀土元素地球化学特征[J]. 地球与环境, 2007(1): 57-60.
- [13] 侯景儒. 实用地质统计学[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [14] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. Environmental pollution, 2001, 114(3): 313-324.
- [15] 中国环境监测总站. 中国土壤元素环境背景值[M]. 中国环境科学出版社, 1990.
- [16] 赵志忠, Rate A W, 唐少霞, 等. 海南岛西部非农用地土壤中的稀土元素地球化学特征[J]. 地球与环境, 2007, 35(4): 303-309.
- [17] 陈江, 毕京博, 许健, 等. 湖州表层土壤稀土元素含量及分布特征[J]. 中国无机分析化学, 2011(4): 68-71.
- [18] 琚彤军, 普灵, 李雅琦, 等. 黄土高原表层土壤稀土元素含量及分布特征研究[J]. 稀土, 2002(5): 54-55.
- [19] 杨元根, 刘从强, 袁可能, 等. 南方红土形成过程及其稀土元素地球化学[J]. 第四纪研究, 2000(5): 469-480.
- [20] 陈杰, 龚子同. 南极半岛海洋气候区的土壤[J]. 土壤, 2003, 35(4): 279-285.
- [21] Condie K C, Dengate J, Cullers R L. Behavior of rare earth elements in a paleoweathering profile on granodiorite in the Front Range, Colorado, USA[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(2): 279-294.

- [22] 朱维晃, 杨元根, 毕华, 等. 土壤中稀土元素地球化学研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003(3): 259—264.
- [23] 闫军才. 稀土元素在大豆中的分异及其影响因素探讨[D]. 安徽农业大学, 2005.
- [24] 朱维晃, 杨元根, 毕华, 等. 海南土壤中稀土元素含量及分布特征[J]. 地球与环境, 2004(2): 20—25.
- [25] Marsh J S. REE fractionation and Ce anomalies in weathered Karoo dolerite[J]. Chemical geology, 1991, 90(3): 189—194.
- [26] 付舜珍, 严重玲, 吴善绮, 等. 贵州省典型土壤中稀土元素含量及分布特征[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 109—115.
- [27] 王玉琦, 孙景信, 屠树德. 湘江谷地土壤中稀土元素含量及分布特征[J]. 环境科学学报, 1988(2): 172—178.
- [28] 章海波, 骆永明. 水稻土和潮土中铁锰氧化物形态与稀土元素地球化学特征之间的关系研究[J]. 土壤学报, 2010(4): 639—645.
- [29] 邱琳, 周青. La(III)对高粱种子萌发的影响[J]. 土壤通报, 2009(3): 653—655.
- [30] 李淑杰, 窦森, 王利敏, 等. 吉林西部葵花种植区稀土元素地球化学特征[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 2081—2086.

Concentration and Spatial Distribution Characters of the Rare-Earth Elements in Soils in Maotai, Guizhou Province

JIANG Tao^{1, 2}, CHEN Wu³, XIAO Tang-fu¹, NING Zeng-ping¹, JIA Yan-long^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Guizhou Institute of Geological Survey, Guiyang 550004, China)

Abstract: A total of 116 surface soil samples were collected from the Maotai area of Guizhou Province, and rare-earth elements (REE) were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The geostatistical and spatial analyses were applied to documenting the concentration distribution, fractional characteristics and spatial distribution of REEs in soils. The results showed that the mean content of Σ REE in soil was 287.1 $\mu\text{g/g}$, much higher than that in China soil (186.8 $\mu\text{g/g}$) and the crust (207 $\mu\text{g/g}$). Relative enrichment of LREE and variable HREE were observed in the soils. δCe showed positive anomalies in the process of soil development, whereas δEu was negatively anomalous. For different soil types, the REEs contents follow the order of moisture soil > purplish soil > paddy soil > limestone soil > yellow soil > yellow brown soil. The Σ REE presented a patch-shaped distribution between high and low concentrations. The results of this study provided useful information to probe the local geographical environment and to help select the backup site for sustainable development of Maotai company.

Key words: soil; REE; spatial distribution; Maotai area