

贵州喀斯特地区基岩-根际土壤-铁皮石斛中 稀土元素分布特征及健康风险评价

杜光映¹, 严福林¹, 何卫军², 谢仁权¹, 王 勤¹

(1. 贵州中医药大学, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省地质矿产资源开发股份有限公司, 贵州 贵阳 550025)

摘要 目的: 分析贵州喀斯特地区仿野生岩缝附生栽培铁皮石斛种植地基岩碳酸盐岩、根际土壤黑色石灰土及铁皮石斛中 14 种稀土元素在岩土植物系统中的分布模式、吸收特征; 为铁皮石斛中稀土元素健康风险评价及富集特征提供科学依据。方法: 采集石栽铁皮石斛、黑色石灰土及碳酸盐岩样品。采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定碳酸盐岩、黑色石灰土及铁皮石斛中稀土元素含量。结果: 碳酸盐岩、黑色石灰土和铁皮石斛中 14 种稀土元素的分布特征呈现明显的继承性。黑色石灰土为稀土元素富集型土壤。铁皮石斛中稀土元素的生物富集系数仅为 0.1%~0.2%, 表明其稀土元素富集能力低。铁皮石斛中 14 种稀土元素平均总量为 0.244 $\mu\text{g/g}$, 其稀土元素总含量未对人体健康造成影响。结论: 铁皮石斛中 14 种稀土元素分布特征明显受控于基岩和根际土壤, 14 种稀土元素较低的吸收特征是导致食用铁皮石斛摄入稀土元素量在安全范围的主要因素。

关键词 铁皮石斛; 稀土元素; 食用安全性; 根际土壤; 喀斯特地区

中图分类号: R282.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4454(2021)10-2274-06

DOI: 10.13863/j.issn1001-4454.2021.10.004

稀土元素位于元素周期表中ⅢB族, 化学性质极为相似, 根据稀土元素质量数的差别, 采用两分法分为 6 种轻稀土(LREE)包括: 镧(La), 铈(Ce), 镨(Pr), 钕(Nd), 钐(Sm), 铕(Eu); 8 种重稀土(HREE)包括: 钆(Gd), 铽(Tb), 镝(Dy), 钬(Ho), 铒(Er), 铥(Tm), 镱(Yb), 镥(Lu)^[1]。由于稀土元素在植物体内具有一定的生理调控能力, 稀土元素能促进中药材活性成分的积累, 提高药材品质^[2]。在农业领域, 通过喷施一定浓度的轻稀土元素 Ce^{3+} 和 La^{3+} 可促进铁皮石斛幼苗壮苗及活性成分的提高^[3-6]。

虽然不同轻稀土元素对农作物的生长有促进作用, 但植物从土壤中吸收稀土元素, 再经过食物链进入人体, 在人体脏器和组织的积累, 从而对人体健康造成不良影响^[7]。目前, 对茶叶、农作物、水果、蔬菜中稀土元素的含量及健康风险性评价都有相关报道^[8-11]; 而关于中药材中稀土元素的研究报道较少, 仅彭益书等^[12]对太子参中稀土元素含量及健康风险进行了系统分析。由于铁皮石斛为药食同源的名贵药材, 长期作为药食同源产品来服用仿野生岩缝附生栽培铁皮石斛, 其所含稀土元素是否会对人体健康造成影响, 目前相关报道甚少。

为此, 本研究以贵州典型喀斯特地区的仿野生岩缝附生栽培铁皮石斛为例(图1), 通过分析 14 种稀土元素在碳酸盐岩-黑色石灰土-铁皮石斛系统中

的分布模式、转化、吸收及分布特征, 揭示铁皮石斛对稀土元素吸收能力的强弱, 以及评价铁皮石斛中稀土元素对人体健康食用的安全性。



图1 仿野生岩缝附生栽培铁皮石斛生长环境

1 材料

7700x ICP-MS 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 Agilent 公司), AutoDigiBlock S60 型全自动消解仪(北京莱伯泰科仪器股份有限公司), MS204S 型 1/1 万电子天平(瑞士 Mettler-Toledo 公司), Milli-Q 型超纯水机(德国 Merck Millipore 公司), ZLGJ-10 型台式真空冷冻干燥机(郑州科旺达生物仪器有限公司)。

收稿日期: 2020-10-02

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(82160717); 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]4Y073号, 黔科合重大专项[2019]3001-1, 黔科合成果[2019]4329号)

作者简介: 杜光映(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要从事中药材品质与地质环境研究; E-mail: 544840279@qq.com。

稀土元素标准溶液(La,Ce,Pr,Nd,Sm,Eu,Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm,Yb,Lu 14 种稀土元素混合标准溶液,质量浓度 10 $\mu\text{g/mL}$,批号:8500-6944)、内标液调谐液(质量浓度 10 ng/mL ,批号:5188-6564)均购自美国 Agilent Technologies 公司。其他试剂均为分析纯。

采集 2 年生仿野生岩缝附生栽培铁皮石斛萌条,共 16 份样品。实验所用样品经贵州中医药大学药学院魏升华教授鉴定为兰科植物铁皮石斛 *Dendrobium officinale* Kimura et Migo 的茎;铁皮石斛生长的根际土壤黑色石灰土由 10 份小样混合为一份样品,共 16 份,岩石样品共 4 份。

2 方法

2.1 样品采集与处理 于 2020 年 4 月初铁皮石斛花期前,在黔西南州兴义市则戎乡冷洞村仿野生岩缝附生栽培铁皮石斛基地,分别采集 160 根左右铁皮石斛萌条,每份铁皮石斛样品由 10 根混合为一份样品,共 16 份样品,铁皮石斛样品依次以自来水、蒸馏水各冲洗 2 次,萌条冻干至恒重,粉碎,过 80 目筛,储存待用。

采集铁皮石斛生长对应的根际土壤黑色石灰土样品各 16 份,每份黑色石灰土每个采样点采集的样品均为间隔 2 m 左右的 10 个小样品的混合样,土壤样品约 500 g。将采集的土样自然风干,去除苔藓、植物残体和石砾等杂质,用玛瑙研磨棒研磨,过 200 目筛,混合均匀,供分析测试用。

选择代表性的基岩碳酸盐岩样品共计 4 份,每份岩石重约 2 kg。将岩石样品依次用自来水、蒸馏水进行冲洗,然后放入球磨机中进行球磨,过 200 目筛,混合均匀,供分析测试用。

2.2 稀土元素含量测定及质量控制 将铁皮石斛供试品 16 份、土壤 16 份、岩石 4 份委托中国科学院地球化学研究所分别测定 14 种稀土元素含量。样品消解、标准溶液制备、仪器工作参数及质量控制参照杜光映等^[13] ICP-MS 测定方法进行测定。

岩石与土壤中稀土元素分析过程采用国家一级标准土样测控分析测试准确度,采用重复样监控分析测试的精密度,样品合格率符合 DZ/T 0258-2014^[14] 中样品分析质量控制要求,分析数据质量可靠。铁皮石斛中稀土元素分析准确度参照 DD 2005-03^[15] 执行,分析质量均符合生物样品分析质量要求。

2.3 铁皮石斛中稀土元素健康风险评价及生物富集系数 参照美国环保局(USEPA)推荐的健康风险评价法,终生平均每天的污染物摄入量(ADI, $\mu\text{g}/$

$\text{g} \cdot \text{d}$)方法进行健康风险评价^[16],计算公式为 $\text{ADI} = (\text{C} \times \text{GW} \times \text{EF} \times \text{ED}) / (\text{BW} \times \text{AT})$ ^[8],式中 C 为铁皮石斛中 14 种稀土元素总含量($\mu\text{g/g}$);GW 为铁皮石斛摄入量,参照 2020 年版中国药典^[17]记载干品铁皮石斛用量为 6~12 g/d,取其最大用量 12 g/d 计算;EF 为暴露频率取 180 d/a;ED 为暴露周期取 70 a;BW 采用 WHO 推荐的标准人体重量取 60 kg;AT 为终生时间取 365×70 d。稀土元素暴露的健康指导值,参照朱为方等^[18]对人群流行病学研究数据提出的每日允许摄入量 ADI 值为 0.07 $\mu\text{g/g} \cdot \text{d}$ 作为健康指导值。

生物富集系数(BCF)是衡量植物选择吸收元素能力的常用指标,常用来表征元素在生物体中的迁移能力,计算方法为 $\text{BCF} = (\text{铁皮石斛中元素含量} / \text{对应根际土壤中元素含量}) \times 100\%$ 。

2.4 数据处理 利用 Excel 2003 进行数据整理,采用 OriginPro 2017 软件进行绘图,在 SPSS 26.0 软件中采用单个正态总体及两正态总体均数 t 检验,单因素方差分析,Pearson 和 Spearman 相关性分析。

3 结果与分析

3.1 基岩中稀土元素分布特征 基岩碳酸盐岩中稀土元素含量分布模式继承了地壳稀土元素平均含量的分布模式(图 2-A)。碳酸盐岩中稀土元素平均含量见表 1。4 个基岩样品中稀土元素总含量(ΣREE)均值为 6.937 $\mu\text{g/g}$;其中,轻稀土元素(ΣLREE)均值为 5.363 $\mu\text{g/g}$,重稀土元素(ΣHREE)均值为 1.574 $\mu\text{g/g}$,轻稀土元素与重稀土元素含量之比($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$)为 3.407,其比值反映了碳酸盐岩中轻、重稀土元素具明显的分馏特征。Ce 的异常程度(δCe)值为 0.5,反应了基岩中 Ce 表现出异常亏损。

单个正态总体 t 检验分析表明:基岩中所含 La,Ce,Pr,Nd,Sm,Eu,Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm,Yb 这 13 种稀土元素总体均数含量显著低于地壳平均含量($P < 0.01$);仅有 Lu 含量与地壳平均含量无显著差异($P = 0.05$)。这表明除 Lu 外,其余 13 种稀土元素含量显著低于地壳平均水平。

3.2 根际土壤中稀土元素分布特征 根际土壤黑色石灰土中稀土元素分布模式继承了贵州省土壤及全国土壤稀土元素平均含量的分布特征(图 2-B)。土壤中稀土元素平均含量见表 1。16 个土壤样品中稀土元素总含量(ΣREE)均值为 162.610 $\mu\text{g/g}$,其中,轻稀土元素(ΣLREE)均值为 143.334 $\mu\text{g/g}$,重稀土元素(ΣHREE)均值为 19.276 $\mu\text{g/g}$;轻、重稀土元素含量之比($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$)为 7.436,反映了

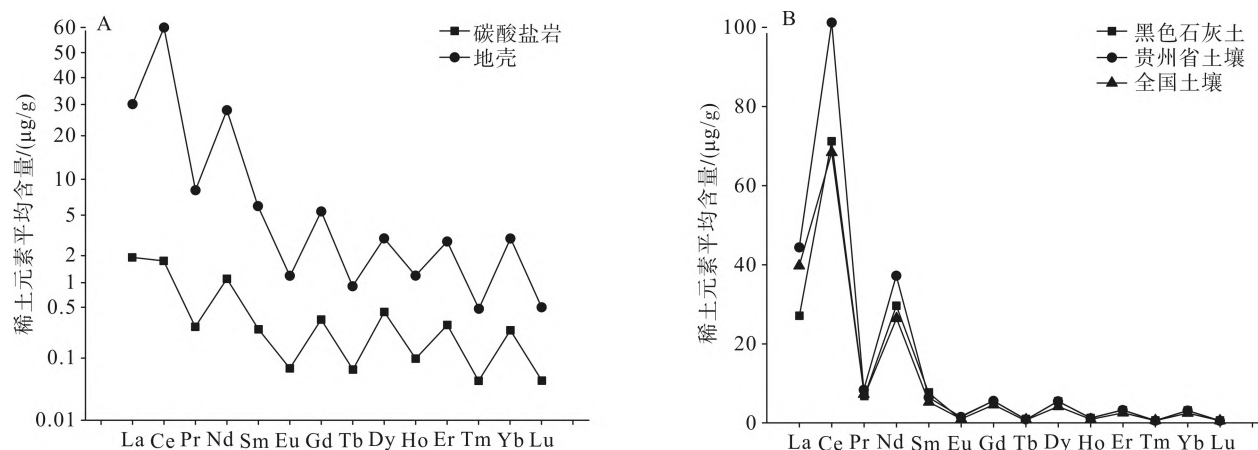


图 2 碳酸盐岩和黑色石灰土中稀土元素平均含量分布曲线

表 1

碳酸盐岩、黑色石灰土和铁皮石斛中稀土元素含量 ($\mu\text{g/g}$)

稀土元素	质量分数 ($\bar{x} \pm s$)			地壳均值*	贵州省土壤均值*	全国土壤均值*
	基岩 ($n=4$)	土壤 ($n=16$)	铁皮石斛 ($n=16$)			
La	1.917 \pm 0.827	27.041 \pm 9.147	0.032 \pm 0.027	30.00	44.40	39.70
Ce	1.748 \pm 0.767	71.156 \pm 28.954	0.116 \pm 0.082	60.00	101.17	68.40
Pr	0.277 \pm 0.161	6.855 \pm 2.489	0.009 \pm 0.005	8.20	8.44	7.17
Nd	1.094 \pm 0.650	29.616 \pm 10.245	0.046 \pm 0.020	28.00	37.17	26.40
Sm	0.257 \pm 0.187	7.623 \pm 2.563	0.006 \pm 0.005	6.00	6.53	5.22
Eu	0.070 \pm 0.048	1.043 \pm 0.323	0.002 \pm 0.002	1.20	1.29	1.03
Gd	0.343 \pm 0.277	4.837 \pm 1.545	0.010 \pm 0.011	5.40	5.54	4.60
Tb	0.068 \pm 0.069	0.849 \pm 0.263	0.001 \pm 0.002	0.90	0.83	0.63
Dy	0.435 \pm 0.449	5.287 \pm 1.557	0.011 \pm 0.004	3.00	5.48	4.13
Ho	0.099 \pm 0.098	1.122 \pm 0.327	0.001 \pm 0.002	1.20	1.10	0.87
Er	0.291 \pm 0.282	3.127 \pm 0.913	0.004 \pm 0.003	2.80	3.13	2.54
Tm	0.045 \pm 0.050	0.475 \pm 0.135	0.001 \pm 0.002	0.48	0.49	0.37
Yb	0.248 \pm 0.251	3.102 \pm 0.885	0.004 \pm 0.002	3.00	3.00	2.44
Lu	0.045 \pm 0.048	0.477 \pm 0.136	0.001 \pm 0.003	0.50	0.47	0.36
Σ LREE	5.363	143.334	0.211	133.40	199.00	147.92
Σ HREE	1.574	19.276	0.033	17.28	20.04	15.94
Σ REE	6.937	162.610	0.244	150.68	219.04	163.86
Σ LREE/ Σ HREE	3.407	7.436	6.394	7.720	9.930	9.280

注: * 参考来源为《贵州省典型土壤中稀土元素含量及分布特征》^[19]

黑色石灰土中轻、重稀土元素也具有明显的分馏特征。

单个正态总体均值 t 检验分析表明: 稀土元素 La, Ce, Pr, Nd, Eu 含量均明显低于贵州省土壤平均含量 ($P < 0.01$); Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu 含量与贵州省土壤平均含量无显著差异 ($P > 0.05$)。Ce, Pr, Nd, Eu, Gd 含量与全国土壤平均含量无显著差异 ($P > 0.05$); Sm, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu 含量均明显高于全国土壤平均含量 ($P < 0.01$), 仅 La 含量明显低于全国土壤平均含量 ($P < 0.01$)。说明研究区黑色石灰土属稀土富集型土壤。

3.3 铁皮石斛中稀土元素分布特征及健康风险评价 16 份铁皮石斛样品中稀土元素平均含量见表

1。 Σ REE 均值为 0.244 $\mu\text{g/g}$, 其中, Σ LREE 均值为 0.211 $\mu\text{g/g}$, Σ HREE 均值为 0.033 $\mu\text{g/g}$; 轻、重稀土元素含量之比 (Σ LREE/ Σ HREE) 为 6.394, 反映出铁皮石斛中轻、重稀土元素也具有明显的分馏特征。Ce 的异常程度 (δCe) 值为 1.429, 反应了铁皮石斛对 Ce 相对富集。

两正态总体均数 t 检验表明, 铁皮石斛中 Ce 含量显著高于其他 13 种稀土元素平均含量 ($P < 0.01$)。铁皮石斛中 Σ LREE 和 Σ HREE 含量较基岩和土壤含量显著降低 ($P < 0.01$), 铁皮石斛中 Σ LREE/HREE 比值较基岩和土壤无显著差异 ($P > 0.05$), 这说明铁皮石斛中轻、重稀土的分馏特征继

承了基岩和土壤的分馏特征。

铁皮石斛中稀土元素 BCF 为 0.1%~0.2%, 这表明铁皮石斛对这 14 种稀土元素的选择吸收能力微弱。其中, 轻稀土元素的 BCF 表现为原子系数为偶数的 Ce, Nd, Eu 是原子系数为奇数的 La, Pr, Sm 的 2 倍; 重稀土元素的 BCF 表现为原子系数为奇数的 Gd, Dy 是原子系数为偶数的相邻 Tb, Ho 的 2 倍, 而原子系数为偶数的 Tm, Lu 是原子系数为奇数的相邻 Er, Yb 的 2 倍。

参照 USEPA 推荐的健康风险评估法, 计算居民食用铁皮石斛摄入稀土元素日均摄入量, 结果显示, 铁皮石斛中稀土元素 ADI 为 0.000024 $\mu\text{g}/\text{g} \cdot \text{d}$, 显著低于 0.07 $\mu\text{g}/\text{g} \cdot \text{d}$ 的安全剂量标准值 ($P < 0.01$)。此外, 石栽铁皮石斛中 ΣREE 为 0.244 $\mu\text{g}/\text{g}$, 显著低于 GB 2762-2005^[20] 中所规定的限量值 0.7 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。从稀土元素总含量的角度分析, 稀土元素对铁皮石斛的食用性安全影响程度低。

3.4 岩土植物系统中稀土元素的分布特征及相关性

3.4.1 岩土植物系统中稀土元素的分布特征: 岩石、土壤和铁皮石斛中稀土元素含量的分布规律如图 3-A 所示, 从图 3-A 可以看出: ①岩石、土壤和铁皮石斛中稀土元素含量符合 Oddo-Harkins 定律, 即原子序数为偶数的元素含量较其相邻的奇数原子序数元素含量高^[21]。②虽然岩石、土壤和铁皮石斛中稀土元素含量存在差异, 但岩石、土壤和铁皮石斛中稀土元素均呈现相似的分布模式特征。

以球粒陨石各稀土元素的均值为标准对稀土元素含量进行标准化处理后取对数值, 可以消除偶数原子序数的稀土元素比奇数原子序数的稀土元素丰度要高的影响, 可以反映岩石、土壤和铁皮石斛中稀土元素分馏的特征^[21]。图 3-B 反映了基岩、土壤和铁皮石斛稀土元素标准化处理后的分配模式, 从图

3-B 可以看出: ①虽然铁皮石斛中 ΣREE 含量较土壤和岩石含量低, 但基岩、土壤和铁皮石斛中 14 种稀土元素分布模式具有继承性。②基岩、土壤和铁皮石斛中 Ce 表现出不同的分布特征, 铁皮石斛中 Ce 表现为强烈富集, 土壤中 Ce 表现为正常值, 基岩中 Ce 表现为强烈亏损。③ ΣLREE 相对 ΣHREE 富集, 岩石、土壤和铁皮石斛中分馏作用十分类似, 但从基岩、土壤和铁皮石斛中的稀土元素分配模式曲线斜率来看, 其倾斜程度难以比较高低。进一步采用单因素方差分析, 基岩、土壤和铁皮石斛中 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 总体均值存在差异 ($F = 7.123, P = 0.003$), LSD 两两间多重比较表明, 土壤和基岩的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 总体均值存在显著差异 ($P = 0.001$); 铁皮石斛和基岩的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 总体均值也存在显著差异 ($P = 0.004$); 但土壤和铁皮石斛的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 总体均值不存在显著差异 ($P = 0.264$), 这说明土壤和铁皮石斛中稀土元素分馏作用相对基岩更为显著, 铁皮石斛中相对更加富集 LREE。

3.4.2 岩土植物系统中稀土元素的相关性: 基岩、土壤和铁皮石斛中稀土元素含量及稀土元素原子序数的相关性分析见表 2。从表 2 可以看出: ①Spearman 秩相关分析表明, 随着原子序数的逐渐增加, 从 La 至 Lu 基岩、土壤和铁皮石斛中稀土元素含量呈显著负相关, 即随着稀土元素原子系数的增加, 基岩、土壤和铁皮石斛中的稀土元素含量呈逐渐减少的趋势; 显著负相关表明轻稀土元素相对重稀土元素的富集在岩土植物系统中具有普遍性特征。②Pearson 相关分析表明, 基岩与土壤、土壤与铁皮石斛、基岩与铁皮石斛所含稀土元素之间均呈现显著正相关; 显著正相关说明铁皮石斛中稀土元素与岩石、土壤间存在着显著的继承性。

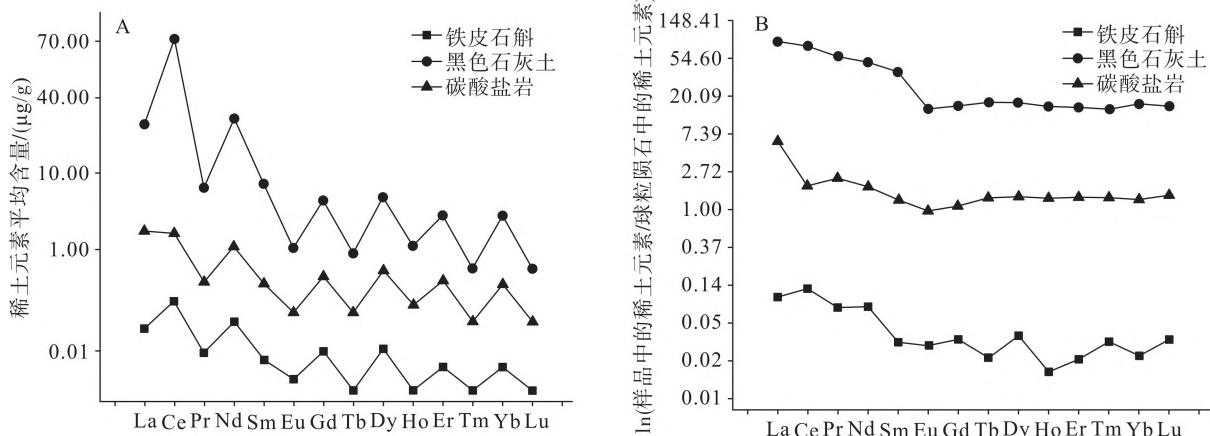


图 3 岩土植物系统中稀土元素分配曲线

表 2 碳酸盐岩、黑色石灰土和铁皮石斛中稀土元素及稀土元素原子序数相关系数

项目	原子序数	碳酸盐岩	黑色石灰土	铁皮石斛
原子序数	1			
碳酸盐岩	-0.693 **	1		
黑色石灰土	-0.793 **	0.866 **	1	
铁皮石斛	-0.728 **	0.817 **	0.993 **	1

注: ** 表示相关性极显著 ($P < 0.01$)

4 讨论

碳酸盐岩、黑色石灰土及铁皮石斛中 14 种稀土元素含量表现为黑色石灰土 > 碳酸盐岩 > 铁皮石斛。碳酸盐岩中较低的稀土元素含量特征与孙承兴等^[22]对贵州碳酸盐岩中稀土元素含量分析结果相吻合。碳酸盐岩-黑色石灰土-铁皮石斛系统中 14 种稀土元素的分配模式呈现明显的继承性,这与太子参、小麦、桉树、芒萁、马尾松、桃金娘、竹子、木麻黄中稀土元素与土壤中稀土元素的继承性特征研究结果相一致^[12,21,23]。这表明植物中稀土元素分布特征与其生长环境对应的土壤中稀土元素分布特征的继承性具有普遍性。目前,基于稀土元素作为特色农产品葡萄酒、普洱茶的溯源甄别已见成效^[24,25],鉴于仿野生岩缝附生栽培铁皮石斛中稀土元素与根际土壤、基岩有显著的继承特征,今后可从稀土元素的角度,开展不同栽培环境下铁皮石斛的指纹识别和溯源甄别研究工作。

石栽铁皮石斛中 Ce 的含量为强烈富集,Ce 元素含量显著高于其他 13 种稀土元素。相关研究表明,随着 Ce^{3+} 浓度的增加, Ce^{3+} 对铁皮石斛中叶绿素含量、T-SOD 酶、CAT 酶活性和根系活力具有显著促进作用^[5]。这说明自然环境下铁皮石斛中 Ce 的富集可能有利于其正常生长和有机成分的积累。

铁皮石斛对稀土元素吸收能力较低,BCF 仅为 0.001 ~ 0.002,其 BCF 显著低于已报道的太子参 (BCF 为 0.016)^[12] 和桉树、芒萁、马尾松、桃金娘、竹子、木麻黄 (BCF 为 0.09 ~ 50.45)^[23],表明铁皮石斛极低的 BCF 可能是由于稀土元素作为植物生长非必须微量元素,铁皮石斛生长过程中防止稀土元素富集而引起毒害作用的发生,其体内形成生理垒,从而导致铁皮石斛中稀土元素含量低的特征。因此,铁皮石斛中低含量的稀土元素以及铁皮石斛中稀土元素 ADI 在安全剂量范围内的含量特征共同表明,正常食用铁皮石斛摄入的稀土元素含量是安全的。

参 考 文 献

[1] 张虎才. 元素表生地球化学特征及理论基础 [M]. 兰

州: 兰州大学出版社, 1997: 118.

- [2] 周洁, 郭兰萍, 肖文娟, 等. 稀土元素的植物生理学效应及其在中药材中的应用 [J]. 中国中药杂志, 2012, 37 (15): 2238-2241.
- [3] 苗永美, 简兴, 方达, 等. 稀土铈对铁皮石斛不定芽诱导、幼苗生长及品质的影响 [J]. 云南农业大学学报 (自然科学), 2020, 35 (6): 1067-1072.
- [4] 苗永美, 童元, 方达, 等. 稀土镧对铁皮石斛不定芽诱导、植株生长及次生代谢产物合成的影响 [J]. 植物研究, 2020, 40 (6): 839-845.
- [5] 张桂芳, 闫小巧, 王艳, 等. 稀土元素镧、铈对铁皮石斛组培苗生长影响的研究 [J]. 广东药学院学报, 2016, 32 (5): 559-564.
- [6] 周伟, 沈亚芳, 刘材材, 等. 稀土微肥对铁皮石斛试管苗壮苗的影响 [J]. 中草药, 2006, 37 (11): 1719-1723.
- [7] 吴永宁. 国内外食品安全风险监测数据需求概述 [J]. 中国食品卫生杂志, 2011, 23 (1): 8-12.
- [8] 卜宁, 史雪敏, 宋海燕, 等. 包头市出产蔬菜水果稀土元素含量检测及健康风险评价 [J]. 现代预防医学, 2021, 48 (4): 628-631, 635.
- [9] 周新, 董学林, 孙勇, 等. 鄂西北某稀土矿区果蔬和肉类中稀土元素含量及健康风险评价 [J]. 现代预防医学, 2020, 47 (19): 3500-3504.
- [10] 王艳敏, 周鸿, 刘源, 等. 江西省出产茶叶中稀土元素暴露风险评价 [J]. 实验与检验医学, 2019, 37 (5): 948-951.
- [11] Li XF, Chen ZB, Chen ZQ, et al. A human health risk assessment of rare earth elements in soil and vegetables from a mining area in Fujian Province, Southeast China [J]. Chemosphere, 2013, 93 (6): 1240-1246.
- [12] 彭益书, 陈蓉, 杨瑞东, 等. 贵阳乌当区太子参及其种植土壤稀土元素分布特征 [J]. 河南农业科学, 2015, 44 (1): 45-51.
- [13] 杜光映, 严福林, 谢仁权, 等. 典型喀斯特地区石栽铁皮石斛岩土植物系统的重金属分析及评价 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27 (19): 141-148.
- [14] DZ/T 0258-2014 多目标区域地球化学调查规范 (1:250 000) [S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2014.
- [15] DD 2005-03 生态地球化学评价样品分析技术要求 (试行) [S]. 北京: 中国地质调查局, 2005.
- [16] United States Environmental Protection Agency. Risk as-

- assessment guidance for superfund volume 1: Human health evaluation manual (Part A) [R]. Washington: United States Environmental Protection Agency, 1989.
- [17] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[S]. 一部. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 295-296.
- [18] 朱为方, 徐素琴, 邵萍萍, 等. 赣南稀土区生物效应研究——稀土日允许摄入量[J]. 中国环境科学, 1997, 17(1): 63-66.
- [19] 付舜珍, 严重玲, 吴善琦. 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.
- [20] GB 2762-2005 食品中污染物限量[S]. 北京: 中华人民共和国卫生部, 2005.
- [21] 顾雪元, 王晓蓉, 顾志忙. 稀土在土壤-植物系统中的分馏效应及影响因素[J]. 环境科学, 2002, 23(6): 74-78.
- [22] 孙承兴, 王世杰, 季宏兵. 碳酸盐岩风化成土过程中 REE 超常富集及 Ce 强烈亏损的地球化学机理[J]. 地球化学, 2002, 31(2): 119-128.
- [23] 苗莉, 徐瑞松, 徐金鸿. 粤西地区土壤-植物系统中稀土元素地球化学特征[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 54-62.
- [24] 赵芳, 林立, 孙翔宇, 等. 基于稀土元素指纹分析识别葡萄酒原产地[J]. 现代食品科技, 2015, 31(2): 261-267.
- [25] 刘宏程, 林昕, 和丽忠, 等. 基于稀土元素含量的普洱茶产地识别研究[J]. 茶叶科学, 2014, 34(5): 451-457.