

茶园土壤类型对铁观音茶叶稀土元素分布和组成的影响

姚清华¹, 颜孙安¹, 张炳铃², 苏火贵², 潘怀阳², 林虬^{1*}

(1. 农业部农产品质量安全风险评估实验室, 福建省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 福州 350003; 2. 安溪县农业与茶果局, 福建泉州 362400)

摘要: 为探明铁观音茶的质量安全状况, 追溯隐患来源, 对福建安溪县不同土壤茶园的铁观音茶叶进行稀土元素的分布、组成、迁移和富集能力进行研究。结果表明, 安溪县红壤、黄红壤、黄壤茶园稀土组成均以镧、铈、钕、钇为主, 但具体组成特征各异。3种类型土壤茶园铁观音茶叶片、叶柄稀土元素组成均以钇、镧、铈、钕4种元素为主, 且含量均以第3叶>第2叶>第1叶>叶柄。同种土壤类型茶园铁观音茶树不同部位叶片的稀土元素组成特征类似, 但叶与叶柄对稀土元素的吸收能力不同。土壤类型对茶叶稀土元素的累积有显著影响, 黄红壤茶园的茶叶稀土元素含量要显著低于红壤、黄壤茶园的($P < 0.05$)。土壤与茶叶中稀土元素组成的相关系数为0.886~0.985, $P < 0.001$, 表明二者稀土元素组成密切相关。因此, 铁观音茶叶中稀土元素累积、分布与茶园土壤类型有显著相关性。

关键词: 铁观音茶; 土壤; 稀土元素; 积累特性

doi: 10.11926/jtsb.3879

Effects of Soil Types in Tea Garden on Distribution and Composition of Rare Earth Elements in Tieguanyin

YAO Qing-hua¹, YAN Sun-an¹, ZHANG Bing-ling², SU Huo-gui², PAN Huai-yang², LIN Qiu^{1*}

(1. *Laboratory of Quality and Safety Risk Assessment for Agro-products, Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology Research, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China*; 2. *Anxi Agriculture and Tea-fruit Bureau, Quanzhou 362400, Fujian, China*)

Abstract: In order to verify the quality safety of Tieguanyin tea, and trace the source of hidden danger, the distribution, composition, transfer and enrichment capacity of rare earth elements in leaves of Tieguanyin planted in 3 types of soil in Anxi County, Fujian Province were studied. The results showed that all of tea and soil types were dominant by La, Ce, Nd and Y, but the composition characters of rare earth elements in soils were different, and the contents of rare earth elements in tea were in the order of the third leaf > the second leaf > the first leaf > leaf stalk. The composition of rare earth elements were similar in leaves at different position planted in the same garden, which were different from leaf stalk. There was significant influence of soil type on accumulation of rare earth elements in tea. The contents of rare earth elements in tea from yellow-red soil were significantly lower than those from red soil and yellow soil ($P < 0.05$). The correlation coefficient of composition of rare earth elements

收稿日期: 2018-01-15 接受日期: 2018-04-08

基金项目: 农业部农产品质量安全风险评估项目(GJFP2017005); 福建省属公益类重点项目(2015R1025-2, 2016R1024-1); 福建省农业科学院创新团队项目(STIT2017-1-12); 福建省农业科学院青年英才基金项目(YC2017-8)资助

This work was supported by the Project for Risk Assessment of Quality Safety of Agricultural Products in Ministry of Agriculture (Grant No. GJFP2017005); the Project for Public Welfare Project of Fujian Province (Grant No. 2015R1025-2, 2016R1024-1); the Project for Innovation Team in Fujian Academy of Agricultural Sciences (Grant No. STIT2017-1-12); and the Project for Youth Talent in Fujian Academy of Agricultural Sciences (Grant No. YC2017-8).

作者简介: 姚清华(1985-), 男, 副研究员, 主要从事农产品质量安全与风险评估研究。E-mail: yaoyaoshuimu@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: linqiu3163@163.com

between tea and soil were 0.886–0.985 ($P < 0.001$), which indicated the composition of rare earth elements in tea was significantly positively correlated with soil types. Therefore, the accumulation and distribution of rare earth elements in Tieguanyin tea had significant relation with soil type of tea garden.

Key words: Tieguanyin tea; Soil; Rare earth element; Accumulation

稀土元素(rare earth elements, REEs)是指元素周期表中第6周期第III副族原子系数从57到71的镧系元素及化学性质极为相似的钇、铥^[1]。根据相对原子质量和化学性质,稀土元素分为轻稀土(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd)和重稀土(Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y、Sc)元素。稀土元素可促进植物根系发育,提高植物叶绿素含量,有效提高植物的抗逆性^[2-3]。土壤中的稀土元素被植物汲取后,通过食物链被人体吸收利用,这是人体中稀土元素的主要来源之一。微量稀土元素对人体有保健作用,主要表现为抗凝血、抗炎、杀菌、抗肿瘤等^[4]。但是长期低剂量摄入稀土元素,会在肝脏、骨骼、脾脏、肾脏中蓄积,导致肝脏形态和病理组织变化、细胞损伤、代谢紊乱^[4-5]。

稀土在农业上应用广泛,已对土壤-植物系统中Cd、Se等元素形态、分布、迁移转化等环境行为进行了大量研究,如水稻(*Oryza sativa*)、小麦(*Triticum aestivum*)等农作物^[1,6-7]。但对其他植物中稀土元素的研究不够深入,尤其是茶园土壤类型对茶树的稀土元素累积、组成影响的研究尚不多见。因此,研究不同土壤类型茶园中稀土元素在茶树的分布和组成对进一步阐明稀土元素对茶树生理功能的影响机理有积极意义。铁观音是汉族传统名茶,中国十大名茶之一,是我国茶业界首枚中国驰名商标。铁观音茶富含茶多酚、维生素、咖啡碱和微量元素等与人体健康密切相关的营养成分^[8]。福建省安溪县是铁观音的知名产区,名列“全国百个重点产茶县”第一位。本文以铁观音茶树为研究对象,阐明安溪茶园主要土壤类型对铁观音茶稀土元素分布及组成特征的影响,为稀土肥料在不同土壤类型茶园的合理使用奠定科学基础。

1 材料和方法

1.1 样品采集和分析

在铁观音茶知名产区福建泉州市安溪县选取3个稀土总量相近,土壤类型分别为红壤、黄壤、黄红壤的茶园为试验基地,3个茶园的铁观音茶树树龄均为10 a,试验全程茶园管理方式完全一致。2017年5月中旬进行取样。

土壤样品的采集和处理 在面积约为100 m²的茶园内进行多点取样(对角线法^[9]设置9个采样点),采集0~30 cm土壤样品,去除石子、植物根系后混合作为1个监测混合样。将混合样品按四分法进行分取,获得不小于1 kg的样品,自然风干,充分研磨,过100目筛,密封贮存,备用。称取0.5 g土样,采用王水-高氯酸法消煮^[1]。

植物样品的采集和处理 在50 cm×50 cm样方根据5点梅花型取样法^[10-11]采茶(驻芽三叶),分开第1叶、第2叶、第3叶和叶柄,用自来水洗涤后,再用去离子水冲洗干净,于80℃烘至恒重,粉碎,过100目筛,密封贮存备用。茶叶中稀土元素分析方法参照GB 5009.94-2012食品安全国家标准:植物性食品中稀土元素的测定^[12]。

稀土元素含量测定 茶叶与土壤前处理过后的样品溶液采用电感耦合等离子体质谱仪(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS)(XSERIES 2)测定稀土元素含量。利用土壤成分分析标准物质-黄土GBW07408(GSS-8)和生物成分分析(茶叶)GBW10016(国家标准物质研究中心)进行质量控制,样品稀土含量以稀土氧化物(REO)计。试验所用试剂均为优级纯。

1.2 统计分析

重金属富集系数(bioaccumulation coefficient, BCF)=植物体含量/土壤含量。采用SPSS 17.0进行数据的差异显著性分析及相关性分析(Duncan多重比较)。土壤和茶样中稀土元素含量以平均值±标准差或平均值表示。

2 结果和分析

2.1 土壤中的稀土元素含量

由表1可见,安溪县3个稀土总量接近的铁观音茶园中,红壤、黄红壤、黄壤稀土元素组成中的轻稀土均以镧、铈、钕3种元素为主,含量分别为96.00、92.60、96.58 mg kg⁻¹,占比分别为76.20%、73.24%、77.36%;3种土壤的重稀土元素均以钇为

主。但3种土壤稀土元素的组成特征各异,红壤的镧、铈、镨显著高于黄红壤、黄壤($P<0.05$);镧元素的比例分别为红壤 14.71%、黄红壤 5.77%和黄壤 4.74%,铈元素的比例为红壤 11.97%、黄红壤 6.04%和黄壤 7.05%,镨元素的比例为红壤 3.23%、黄红壤 1.67%和黄壤 1.61%;黄红壤、黄壤的铈显著高

于红壤($P<0.05$),其比例分别为黄红壤 58.05%、黄壤 55.22%和红壤 41.86%。黄壤的钆显著高于黄红壤和红壤($P<0.05$),比例分别为黄壤 5.39%、红壤 1.94%和黄红壤 1.16%。黄壤、红壤的铈显著高于黄红壤($P<0.05$),比例分别为黄壤 0.61%、红壤 0.46%和黄红壤 0.08%。

表1 安溪县茶园不同类型土壤稀土含量(mg kg^{-1})

Table 1 Contents of rare earth elements (mg kg^{-1}) in soils of tea gardens in Anxi

元素 Element	红壤 Red soil	黄壤 Yellow soil	黄红壤 Yellow-red soil
镧 La*	18.53 ±0.16c	5.99 ±0.32a	7.21 ±0.37b
铈 Ce*	52.74 ±3.22a	69.82 ±2.04b	72.48 ±3.12b
镨 Pr*	4.07 ±0.12b	2.04 ±0.02a	2.08 ±0.03a
铈 Nd*	15.08 ±0.61c	8.91 ±0.32b	7.54 ±0.41a
钐 Sm*	2.45 ±0.03b	6.81 ±0.21c	1.46 ±0.07a
铈 Eu*	0.58 ±0.06b	0.77 ±0.02c	0.10 ±0.00a
钆 Gd*	2.55 ±0.23b	2.24 ±0.12b	1.73 ±0.06a
铈 Y	6.92 ±0.22b	4.64 ±0.24a	7.58 ±0.42b
铈 Tb	0.25 ±0.01	0.25 ±0.02	0.20 ±0.02
镨 Dy	1.50 ±0.12	1.66 ±0.19	1.61 ±0.08
铈 Ho	0.26 ±0.01a	0.28 ±0.06a	0.33 ±0.06b
铈 Er	0.84 ±0.21a	0.80 ±0.02a	1.21 ±0.04b
铈 Tm	0.13 ±0.03a	0.13 ±0.02a	0.22 ±0.03b
铈 Yb	1.16 ±0.09a	1.05 ±0.05a	2.13 ±0.07b
铈 Lu	0.18 ±0.03a	0.16 ±0.02a	0.34 ±0.03b
总和 Total	125.98 ±5.37	124.85 ±6.25	126.43 ±7.65

*: 轻稀土元素;同行数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

*: Light rare earth element. Data followed different letter at the same line indicate significant difference at 0.05 level.

2.2 铁观音不同部位叶片及叶柄稀土元素含量

由图1可见,3种类型土壤茶园中茶树叶片、叶柄的稀土元素组成均以钇、镧、铈、铈4种元素为主,占稀土元素总量的61.26%~69.04%,与土壤中4种元素的比例(67.39%~70.01%)相近。同种土壤类型茶树不同部位叶片的稀土元素组成特征类似,但茶叶与叶柄对不同稀土元素的吸收能力具有明显不同:红壤的茶叶柄对镧、铈、铈、铈、铈、铈的吸收能力强于叶片,但对钇、铈、铈、铈的吸收能力弱于叶片;黄壤的茶叶柄对镧、铈、钆、铈、铈的吸收能力强于叶片,但对钇、铈、铈、铈的吸收能力弱于叶片;黄红壤的茶叶柄对镧、铈、钆、钆、钆、钆的吸收能力强于叶片,但对铈的吸收能力弱于叶片。可见,3种土壤茶园栽培的茶树柄都比叶片具有更强的镧元素吸收能力,但对铈元素的吸收能力较叶片弱。稀土含量分布与茶叶部位密切相关,不同叶片对稀土元素的累积水平不同,3种土壤类型茶叶不同部位稀土元素绝对含量的变化

趋势一致,均为第3叶>第2叶>第1叶>叶柄。

2.3 不同土壤类型铁观音茶叶的稀土元素含量

土壤类型对茶叶稀土元素的累积有明显影响,黄红壤茶园的铁观音茶叶稀土元素含量要显著低于红壤、黄壤的($P<0.05$) (图1)。同一部位叶片的稀土元素组成特征在红壤、黄壤中较为一致,叶片的稀土元素含量均为铈>铈>镧>钇,叶柄的为镧>铈>铈。黄红壤茶园叶片的稀土元素含量为铈>镧>铈>铈,叶柄的为铈>镧>铈。红壤、黄壤茶园的茶树叶片、叶柄的钇、镧、铈、铈相对含量显著高于黄红壤茶园的茶树叶片、叶柄($P<0.05$);红壤、黄壤茶园的茶树叶片铈、铈、铈、铈相对含量显著高于黄红壤茶园的茶树叶片($P<0.05$);红壤茶园的茶树叶柄铈、铈、铈、铈相对含量显著高于黄壤、黄红壤茶园的茶树叶柄($P<0.05$),黄红壤茶园的茶树叶柄铈、钆、钆、钆、钆、钆相对含量显著高于红壤、

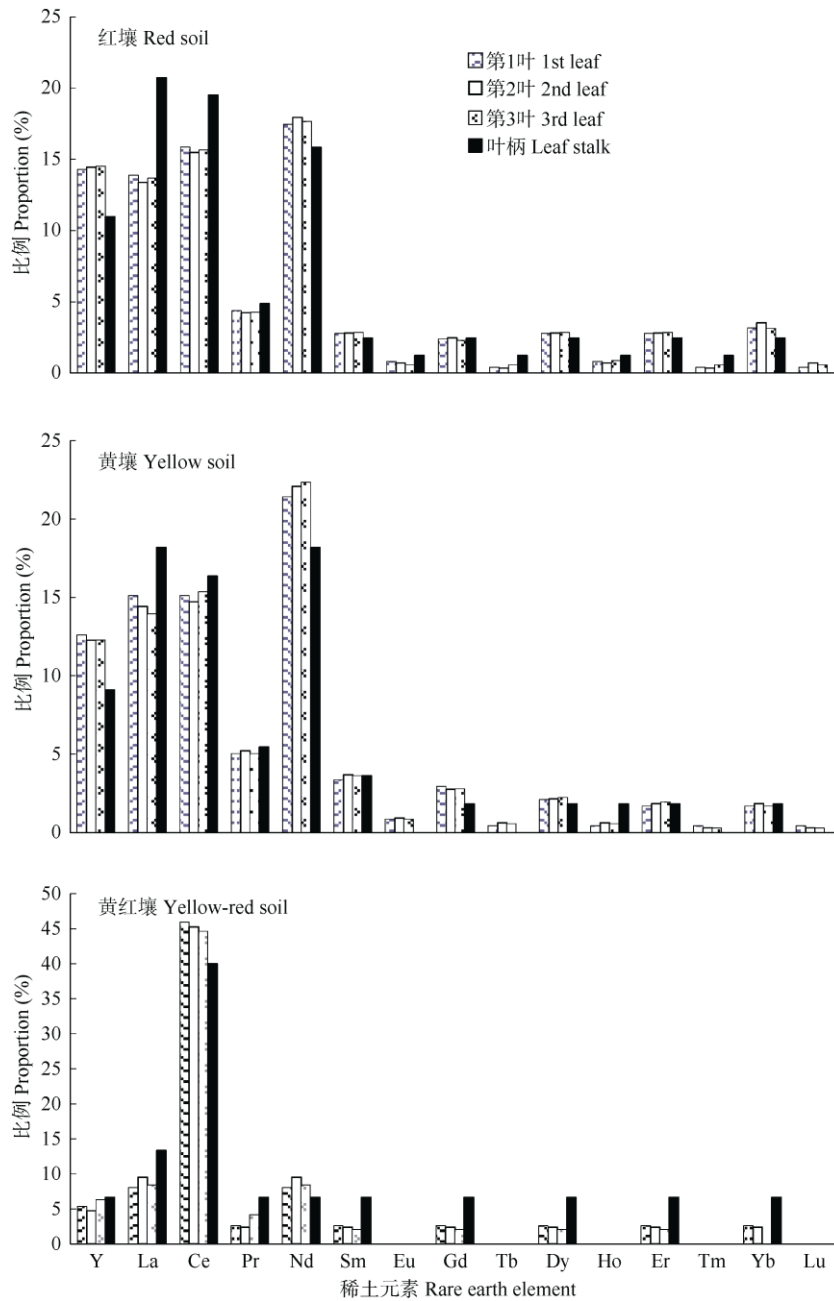


图 1 铁观音不同叶片及叶柄稀土元素组成

Fig. 1 Contents of rare earth elements at different position of Tieguanyin

黄壤茶园的茶树叶柄($P < 0.05$), 黄红壤茶园的茶树叶片铈相对含量显著高于红壤、黄壤茶园的茶树叶片($P < 0.05$), 其中茶叶、叶柄中铈、钪含量的变化趋势与相应的土壤一致, 其余稀土元素与土壤中的稀土元素相对含量差异明显。

2.4 不同土壤类型铁观音茶叶对稀土元素的积累能力

富集系数(BCF)是衡量植物重金属积累能力大小的重要指标, BCF 越大, 植物对重金属的吸收富

集能力越强^[13]。由表 2 可见, 铁观音叶片对稀土元素的积累能力较弱, 且与茶树部位、土壤类型、稀土元素种类密切相关; 红壤茶园种植的铁观音叶片对铈、钪、镧, 铁观音叶柄对铈等重稀土元素的积累能力强于黄壤、黄红壤茶园; 黄壤茶园铁观音叶片对钪、镧、镨、钕 4 种轻稀土, 铈、钪、镧 3 种重稀土元素, 叶柄对钆具有较强的积累能力强于红壤、黄红壤茶园; 黄红壤茶园铁观音叶片对稀土元素的积累能力弱于红壤、黄壤。

表 2 不同类型土壤中铁观音对稀土元素的富集系数

Table 2 Bioaccumulation coefficient of rare earth elements in Tieguanyin from different types of soil

元素 Element	红壤 Red soil				黄壤 Yellow soil				黄红壤 Yellow-red soil			
	第一叶 1st leaf	第二叶 2nd leaf	第三叶 3rd leaf	叶柄 Leaf stalk	第一叶 1st leaf	第二叶 2nd leaf	第三叶 3rd leaf	叶柄 Leaf stalk	第一叶 1st leaf	第二叶 2nd leaf	第三叶 3rd leaf	叶柄 Leaf stalk
钇 Y	0.05	0.06	0.07	0.01	0.07	0.09	0.09	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
镧 La	0.02	0.02	0.03	0.01	0.06	0.08	0.08	0.02	<0.01	0.01	0.01	<0.01
铈 Ce	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
镨 Pr	0.03	0.03	0.04	0.01	0.06	0.08	0.09	0.01	0.01	0.01	0.01	<0.01
钕 Nd	0.03	0.03	0.04	0.01	0.06	0.08	0.09	0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01
钐 Sm	0.03	0.03	0.04	0.01	0.01	0.02	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01
铕 Eu	0.03	0.03	0.04	0.01	0.03	0.04	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	-
钆 Gd	0.02	0.03	0.03	0.01	0.03	0.04	0.04	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01
铽 Tb	0.05	0.06	0.07	0.04	0.05	0.07	0.07	0.01	-	-	-	-
镝 Dy	0.05	0.05	0.07	0.01	0.03	0.04	0.05	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01
铪 Ho	0.07	0.09	0.11	0.04	0.05	0.06	0.07	0.05	-	-	-	-
铒 Er	0.09	0.10	0.12	0.02	0.06	0.08	0.09	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
铥 Tm	0.10	0.11	0.14	0.08	0.05	0.08	0.08	0.01	-	-	-	-
镱 Yb	0.07	0.08	0.10	0.02	0.04	0.06	0.06	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
镱 Lu	0.08	0.09	0.11	0.02	0.05	0.07	0.08	0.01	-	-	-	-
总和 Total	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

2.5 相关性分析

表 3 为不同土壤类型与铁观音叶、叶柄的稀土元素含量的相关性分析,结果表明,土壤稀土元素含量与叶片的相关系数为 0.886~0.985、与叶柄的

相关系数为 0.904~0.966,且 P 均<0.01,达差异极显著,表明变量间存在着极显著的正相关关系,即铁观音茶叶、叶柄中的稀土元素含量与土壤的密切相关。

表 3 土壤稀土与铁观音稀土的 Pearson 相关性

Table 3 Correlation coefficient between rare earth elements in tea and soil

		相关系数 Correlation coefficient	P
红壤 Red soil	土壤-叶片 Soil-leaf	0.941**	<0.001
	土壤-叶柄 Soil-leaf stalk	0.966**	<0.001
黄红壤 Yellow-red soil	土壤-叶片 Soil-leaf	0.985**	<0.001
	土壤-叶柄 Soil-leaf stalk	0.980**	<0.001
黄壤 Yellow soil	土壤-叶片 Soil-leaf	0.886**	<0.001
	土壤-叶柄 Soil-leaf stalk	0.904**	<0.001

**: P <0.01

3 结论和讨论

稀土元素广泛存在于自然界中,并可通过食物在生物链中传递。植物中稀土元素含量因种类而异^[14-16],羊齿类植物富含稀土,如中山核桃(*Juglans regia*)叶片的稀土含量达 2.5%以上^[17]。本研究中茶叶对土壤稀土元素的富集系数 ≤ 0.03 ,表明茶树对土壤稀土元素的吸收能力较弱,这与前人的研究结果一致^[1,18]。这可能是茶树为喜酸性土壤植物,而土壤 pH 会影响稀土元素的可给性^[19]。相关性分析结果表明,铁观音茶叶稀土元素含量及组成特征与土壤的有显著相关性,且受土壤类型影响。土壤的元素组成受土壤形成过程中岩石风化、成土母质、地形

地貌、气候、生物等因素的影响^[20-21],土壤性质及元素含量及组成特征是导致同种植物体内稀土元素含量及组成差异的因素之一,冉勇等^[16,22]的研究表明,土壤中铁锰氧化物可专性吸附稀土元素,而土壤理化性质差异直接影响稀土元素的生物有效性。土壤的 pH、氧化还原电位、有机质、阳离子交换量等均影响稀土元素在土壤中的吸附性能和迁移性、形态转化与可给性^[15]。有研究表明^[23],红壤、黄壤、黄红壤的质地、有机质含量、pH 值、阳离子交换量等有明显差异。可见,3 种土壤的性质差异是导致铁观音茶稀土元素含量及组成差异的关键性因素。土壤性质差异如何影响铁观音茶树对稀土元素吸收、分异机理还有待进一步研究阐

明。铁观音茶中稀土元素含量呈现第3叶>第2叶>第1叶>叶柄的变化趋势,这与乌龙茶产区的茶叶稀土元素分布变化趋势类似^[4]。因此,以芽头制茶的茶类稀土元素含量要明显低于以成熟叶和老叶为原料制茶的茶类,如福鼎白毫银针、福安红茶的稀土元素含量显著低于武夷岩茶、铁观音^[4]。在红壤、黄壤、黄红壤茶园铁观音叶柄与叶片累积稀土元素的种类均存明显差异,这与其他植物不同部位对稀土元素累积的差异相似,陈磊等^[4]的研究表明,与茶树其他部位的稀土元素组成相比,叶柄更容易累积轻稀土,茎更容易累积重稀土。丁士明等^[24]的研究表明,大豆(*Glycine max*)根部和叶片呈现轻稀土和重稀土富集,茎中出现轻、重稀土轻微分异。

综上所述,安溪县红壤、黄红壤、黄壤茶园的稀土元素组成均以镧、铈、钕、钇为主,但具体组成特征各异。3种类型土壤茶园铁观音叶片、叶柄的稀土元素组成均以钇、镧、铈、钕4种元素为主,含量均以第3叶>第2叶>第1叶>叶柄。同种土壤类型茶园茶树不同部位叶片的稀土元素组成特征类似,但茶叶与叶柄对稀土元素的吸收能力不同。土壤类型对铁观音叶片稀土元素的累积有明显影响,黄红壤茶园的铁观音叶稀土元素含量要显著低于红壤、黄壤茶园的($P<0.05$)。土壤稀土元素组成与铁观音叶稀土元素组成的相关系数为0.886~0.985, $P<0.01$,表明二者稀土元素组成密切相关。本研究结果可为稀土肥料在不同土壤类型茶园的合理使用奠定研究基础。

参考文献

- [1] LIU P P, CHEN Z, SUN G X, et al. Bioaccumulation of rare earth elements in paddy soils in and surrounding the REEs Mine [J]. *Acta Sci Circumst*, 2016, 36(3): 1006–1014. doi: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0502. 刘攀攀, 陈正, 孙国新, 等. 稀土矿区及其周边水稻田中稀土元素的生物迁移累积特征 [J]. *环境科学学报*, 2016, 36(3): 1006–1014. doi: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0502.
- [2] DING S M, LIANG T, ZHANG C S, et al. Role of ligands in accumulation and fractionation of rare earth elements in plants: Examples of phosphate and citrate [J]. *Biol Trace Elem Res*, 2005, 107(1): 73–86. doi: 10.1385/BTER:107:1:073.
- [3] LI J X, HONG M, YIN X Q, et al. Effects of the accumulation of the rare earth elements on soil macrofauna community [J]. *J Rare Earth*, 2010, 28(6): 957–964. doi: 10.1016/S1002-0721(09)60233-7.
- [4] LIN Q, YAO Q H, SU D S, et al. Distribution and composition of rare earth elements in tea of Fujian province [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2016, 16(10): 190–196. doi: 10.16429/j.1009-7848.2016.10.026. 林虬, 姚清华, 苏德森, 等. 福建省主要茶类稀土含量区域分布及组成特征 [J]. *中国食品学报*, 2016, 16(10): 190–196. doi: 10.16429/j.1009-7848.2016.10.026.
- [5] YU L, DAI Y C, YUAN Z K, et al. Effects of rare earth elements on telomerase activity and apoptosis of human peripheral blood mononuclear cells [J]. *Biol Trace Elem Res*, 2007, 116(1): 53–59. doi: 10.1007/BF02685918.
- [6] CHEN J D, LIU M, GU H Y, et al. Effects of wheat straw and lead on cadmium remove in rice-soil systems in different texture soils [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2011, 30(7): 1295–1299. 陈京都, 刘萌, 顾海燕, 等. 不同土壤质地条件下麦秸、铅对镉在水稻-土壤系统中迁移的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(7): 1295–1299.
- [7] ANTANAITIS A, LUBYTE J, ANTANAITIS S, et al. Selenium concentration dependence on soil properties [J]. *J Food Agric Environ*, 2015, 6(1): 163–167.
- [8] YAO Q H, LIN Q, YAN S A, et al. Application of heavy rare earth elements as a fingerprint in discriminant analysis of An'xi Tieguanyin tea and Hua'an Tieguanyin tea [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2017, 33(4): 295–299. doi:10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.4.045. 姚清华, 林虬, 颜孙安, 等. 基于稀土元素指纹分析判别安溪铁观音和华安铁观音的研究 [J]. *现代食品科技*, 2017, 33(4): 295–299. doi: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.4.045.
- [9] ZANG J M, TANG X Q, ZHAI Y X, et al. Community structure spring orchard of soil macrofauna in Linzhi, Tibet [J]. *J NW Agric For Univ (Nat Sci)*, 2016, 44(7): 159–164, 172. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.07.023. 臧建成, 唐晓琴, 翟云霞, 等. 西藏林芝地区果园春季大型土壤动物群落结构研究 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(7): 159–164, 172. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.07.023.
- [10] ZHANG Q H, WANG G, ZHU J, et al. Comprehensive evaluation of potential ecological risk of heavy metals in the surface soil of the farmland in wastewater irrigation area of southern suburbs in Baotou [J]. *J NW Agric For Univ (Nat Sci)*, 2012, 40(7): 181–186, 192. 张庆辉, 王贵, 朱晋, 等. 包头南郊污灌区农田表层土壤重金属潜在生态风险综合评价 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(7): 181–186, 192.
- [11] SU H G. Effect of different fertilization modes on the yield of Huangjingui spring tea [J]. *Fujian Agri Sci Technol*, 2014, 45(3): 17–18. doi: 10.3969/j.issn.0253-2301.2014.03.007.

- 苏火贵. 不同施肥模式对黄金桂春茶产量的影响 [J]. 福建农业科技, 2014, 45(3): 17-18. doi: 10.3969/j.issn.0253-2301.2014.03.007.
- [12] Minister of Health of the People's Republic of China. GB 5009.94-2012 National Food Safety Standards: Determination of rare earth elements content in foods [S]. Beijing: China standard Press, 2012: 1-5. 中华人民共和国卫生部. GB 5009.94-2012 食品安全国家标准: 植物性食品中稀土元素的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 1-5.
- [13] HAN Q H, YANG Y, HUANG X, et al. Migration and accumulation of heavy metals in Hawk tea [J]. J Nucl Agric Sci, 2016, 30(11): 2224-2231. doi: 10.11869/j.issn.100-8551.2016.11.2224. 韩巧红, 杨勇, 黄霞, 等. 老鹰茶对重金属元素的迁移与富集特征 [J]. 核农学报, 2016, 30(11): 2224-2231. doi: 10.11869/j.issn.100-8551.2016.11.2224.
- [14] CHEN L, LIN D L, GAO Z P, et al. The distribution of rare earth elements in tea garden soil and oolong tea [J]. J Fujian Agric For Univ (Nat Sci), 2011, 40(6): 595-601. doi: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci).2011.06.010 陈磊, 林锻炼, 高志鹏, 等. 稀土元素在茶园土壤和乌龙茶中的分布特性 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2011, 40(6): 595-601. doi: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci).2011.06.010
- [15] XU X K. Research advances in the behavior and fate of rare earth elements in soil-plant systems [J]. J Agro-Environ Sci, 2005, 24(S1): 315-319. doi: 10.3321/j.issn:1672-2043.2005.z1.077. 徐星凯. 稀土元素在土壤-植物系统中行为与归宿的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(S1): 315-319. doi: 10.3321/j.issn:1672-2043.2005.z1.077.
- [16] LIANG T, DING S M, SONG W C, et al. Advances of rare earth elements fractionations and mechanisms studies in plants and their significance [J]. J Chin Rare Earth Soc, 2007, 25(2): 129-137. doi: 10.3321/j.issn:1000-4343.2007.02.001. 梁涛, 丁士明, 宋文冲, 等. 稀土元素在植物中的分异研究进展 [J]. 中国稀土学报, 2007, 25(2): 129-137. doi: 10.3321/j.issn:1000-4343.2007.02.001.
- [17] HU Q H, YE Z J. Physiological effects of rare-earth elements on plants [J]. Plant Physiol Commun, 1996, 32(4): 296-300. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.1996.04.022. 胡勤海, 叶兆杰. 稀土元素的植物生理效应 [J]. 植物生理学通讯, 1996, 32(4): 296-300. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.1996.04.022.
- [18] LIN D L. Contents of rare earth elements and their relationship of soil and tea in Oolong tea garden of Fujian [J]. Chin Tea, 2011, 33(10): 22-24. doi: 10.3969/j.issn.1000-3150.2011.10.012. 林锻炼. 福建乌龙茶茶园土壤与茶叶中稀土含量及其相关性 [J]. 中国茶叶, 2011, 33(10): 22-24. doi: 10.3969/j.issn.1000-3150.2011.10.012.
- [19] RAN Y, LIU Z. Adsorption and desorption characteristics of rare earth elements in typical soils of China [J]. J Chin Rare Earth Soc, 1992, 10(4): 377-380. 冉勇, 刘铮. 我国主要类型土壤对稀土元素的吸附和解吸特征 [J]. 中国稀土学报, 1992, 10(4): 377-380.
- [20] NEJATOLAH M, MORTAZAVI S, ILDOROMI A. Levels of Cu, Zn, Pb, and Cd in the leaves of the tea plant (*Camellia sinensis*) and in the soil of Gilan and Mazandaran farms of Iran [J]. J Food Meas Charact, 2014, 8(4): 277-282. doi: 10.1007/s11694-014-9186-3
- [21] QI G L, SU X L, WANG J, et al. Contents of rare earth elements in soils and fruits of *Lycium barbarum* L. in different regions and their relationship [J]. J S Agric, 2014, 45(7): 1206-1210. doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2014.7.1206. 齐国亮, 苏雪玲, 王俊, 等. 宁夏枸杞主产区土壤和果实中稀土元素含量及其相关性 [J]. 南方农业学报, 2014, 45(7): 1206-1210. doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2014.7.1206.
- [22] WU J, FENG X J. Progress in the plant ecological effects of rare earth elements [J]. Chin Res Compr Utiliz, 2012, 30(4): 37-40. doi: 10.3969/j.issn.1008-9500.2012.04.008. 吴晶, 冯秀娟. 稀土元素对植物的生物有效性研究进展 [J]. 中国资源综合利用, 2012, 30(4): 37-40. doi: 10.3969/j.issn.1008-9500.2012.04.008.
- [23] LI J Q. Comparison of red, red-yellow and yellow soil and rational development and utilization in Wuyi Mountain [J]. Anhui Agric Sci Bull, 2011, 17(11): 40-42, 68. doi: 10.3969/j.issn.1007-7731.2011.11.016. 李金全. 武夷山红壤、黄红壤与黄壤参比及合理开发利用 [J]. 安徽农学通报, 2011, 17(11): 40-42, 68. doi: 10.3969/j.issn.1007-7731.2011.11.016.
- [24] DING S M, LIANG T, YAN J C, et al. Fractionations of rare earth elements in plants and their conceptive model [J]. Sci China (Ser C), 2006, 36(4): 312-319. doi: 10.3969/j.issn.1674-7232.2006.04.003. 丁士明, 梁涛, 阎军才, 等. 稀土元素在植物中的分异及其概念模型 [J]. 中国科学 C 辑, 2006, 36(4): 312-319. doi: 10.3969/j.issn.1674-7232.2006.04.003.