

# 云南临沧大叶种茶树不同组织中 稀土元素的含量分布特征

谢 佳<sup>1</sup>, 阮亚男<sup>1</sup>, 李秋桦<sup>1</sup>, 缪德仁<sup>2\*</sup>

(1. 昆明学院 农学与生命科学学院, 云南 昆明 650214; 2. 昆明学院 化学化工学院, 云南 昆明 650214)

**摘要:** 为查明稀土元素在茶树各组织中的含量分布特征. 采用微波消解 - ICP-MS 法对云南大叶种茶园土壤和茶树不同组织中的 REEs 含量分布特征进行研究. 结果表明, 轻稀土氧化物总量 ( $\sum$ LREEs) 和重稀土氧化物总量 ( $\sum$ HREEs) 在茶树各组织中的降序均为:  $w(\text{皮}) > w(\text{鲜叶}) > w(\text{茎}) > w(\text{根}) > w(\text{花}) > w(\text{果})$ ; 茶树组织中各轻稀土元素氧化物总量之和的降序排列为:  $w(\sum \text{La}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{CeO}_2) > w(\sum \text{Nd}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{Pr}_6\text{O}_{11}) > w(\sum \text{Sm}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{Eu}_2\text{O}_3)$ , 茶树组织中各重稀土元素氧化物总量之和的降序排列为:  $w(\sum \text{Gd}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{Dy}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{Er}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{Yb}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{Ho}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{Tb}_4\text{O}_7) > w(\sum \text{Tm}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{Lu}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{Y}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{Sc}_2\text{O}_3)$ ; 但在茶叶鲜叶中, 各 LREEs 氧化物含量的降序排列为:  $w(\text{CeO}_2) > w(\text{La}_2\text{O}_3) > w(\text{Nd}_2\text{O}_3) > w(\text{Pr}_6\text{O}_{11}) > w(\text{Sm}_2\text{O}_3) > w(\text{Eu}_2\text{O}_3)$ . 转移系数计算结果显示, 稀土元素在茶树皮层组织中的转移系数最高, 而在花和果实中的转移系数最低; 在茶叶鲜叶中, 除 Y 和 Sc 以外, 其余稀土元素的转移系数均较为接近, 说明轻、重稀土元素在土壤 - 茶树 - 鲜叶系统中的迁移能力无显著差异.

**关键词:** 云南临沧; 大叶种茶树; 稀土元素; 植物组织; 迁移系数

**中图分类号:** TS272.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674 - 5639 (2020) 03 - 0032 - 05

**DOI:** 10. 14091/j. cnki. kmxyxb. 2020. 03. 007

## Concentration Distribution Characteristics of REEs in Different Tissues of Large-leaf Tea Plants in Yunnan Lincang

XIE Jia<sup>1</sup>, RUAN Yanan<sup>1</sup>, LI Qiuhua<sup>1</sup>, MIAO Deren<sup>2\*</sup>

(1. College of Agriculture and Life Sciences, Kunming University, Kunming, Yunnan, China 650214;

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Kunming University, Kunming, Yunnan, China 650214)

**Abstract:** In order to reveal the features of the concentration distribution of REEs in different tissues of large-leaf tea plants, the concentrations of REEs in different tissues of tea plant and soil in Yunnan large-leaf tea garden were studied by microwave digestion-ICP-MS. The results showed that the descending order of total light rare earth oxides ( $\sum$ LREEs) and total heavy rare earth oxides ( $\sum$ HREEs) in different tissues of tea plant is  $w(\text{bark})$ ,  $w(\text{tender leaf})$ ,  $w(\text{stem})$ ,  $w(\text{root})$ ,  $w(\text{flower})$  and  $w(\text{fruit})$ . The descending order of the total amount of the light rare earth elements in the tea tissues is  $w(\sum \text{La}_2\text{O}_3)$ ,  $w(\sum \text{CeO}_2)$ ,  $w(\sum \text{Nd}_2\text{O}_3)$ ,  $w(\sum \text{Pr}_6\text{O}_{11})$ ,  $w(\sum \text{Sm}_2\text{O}_3)$  and  $w(\sum \text{Eu}_2\text{O}_3)$ . The descending order of the sum of total amount of each heavy rare earth element oxide in tea plant tissue is  $w(\sum \text{Gd}_2\text{O}_3)$ ,  $w(\sum \text{Dy}_2\text{O}_3)$ ,  $w(\sum \text{Er}_2\text{O}_3)$ ,  $w(\sum \text{Yb}_2\text{O}_3)$ ,  $w(\sum \text{Ho}_2\text{O}_3)$ ,  $w(\sum \text{Tb}_4\text{O}_7)$ ,  $w(\sum \text{Tm}_2\text{O}_3)$ ,  $w(\sum \text{Lu}_2\text{O}_3)$ ,  $w(\sum \text{Y}_2\text{O}_3)$  and  $w(\sum \text{Sc}_2\text{O}_3)$ . However, the descending order of LREEs content in tender tea leaves is  $w(\text{CeO}_2)$ ,  $w(\text{La}_2\text{O}_3)$ ,  $w(\text{Nd}_2\text{O}_3)$ ,  $w(\text{Pr}_6\text{O}_{11})$ ,  $w(\text{Sm}_2\text{O}_3)$  and  $w(\text{Eu}_2\text{O}_3)$ . The calculating results of translocation factors (TFs) showed that the highest TF of REEs is in the cortex tissue of tea plant, while the lowest is in the flower and fruit. For the tender tea leaves, the TFs of other REEs are relatively close except Y and Sc, indicating that the transfer ability of both light and heavy REEs has no significant

收稿日期: 2020 - 05 - 06

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金资助项目 (2020Y0479); 国家自然科学基金资助项目 (31960057).

作者简介: 谢佳 (1996—), 女, 四川成都人, 在读硕士研究生, 主要从事资源利用与植物保护研究.

\* 通讯作者: 缪德仁 (1969—), 男, 云南丽江人, 教授, 博士, 主要从事分析化学方面的研究, E-mail: mdr31882@126.com.

difference in the system of soil, tea and tender leaves system.

**Key words:** Yunnan Lincang; large-leaved tea plant; rare earth elements; plant tissue; translocation factor

稀土元素 (Rare earth elements, REEs) 广泛存在于自然环境中, 但其生命的必要性和环境毒性一直未得到充分证实和引起高度重视<sup>[1]</sup>. 近年来, 随着在 REEs 中部分元素的环境毒性研究方面所取得的进展<sup>[2]</sup> 和生命必需性的证实<sup>[3]</sup>, REEs 在环境和食物链中的迁移、转化和累积引起了国内外研究者的极大兴趣和高度重视.

大叶种普洱茶 (*Camellia sinensis* var. *assamica* L.) 是极具云南高原特色的农产品之一, 其营养和安全问题是研究的主题<sup>[4-5]</sup>. 近年来, 围绕茶叶营养和饮用安全的研究较多<sup>[6-8]</sup>, 但绝大多数研究主要是基于最终产品“茶叶”, 而忽视了 REEs 在茶叶生产过程中的循环作用. 实际上, REEs 对植物生长的影响尚存争议<sup>[9]</sup>, 例如, La 在我国农业中的广泛应用已有 30 多年的历史<sup>[10]</sup>. 有研究<sup>[11]</sup> 表明, La 和 Ce 有利于小麦的生长和发育, 施用后可使小麦的产量增加 10%. 然而也有研究<sup>[12]</sup> 表明, 稀土肥的施用则会限制玉米、大豆和大麦根系的伸长. 有的研究<sup>[11]</sup> 认为这样的影响与稀土肥的用量有关, 而有的研究<sup>[13]</sup> 则认为这样的影响与环境条件有关.

毋庸置疑, 适量的 REEs 在植物生长过程中的循环有助于植物的生长发育, 为人类的发展谋得福利, 但过量的 REEs 在农产品中的累积也给人类的健康带来威胁. 然而, 目前关于土壤、水生和陆地资源以及生物实体中 REEs 阈值水平的信息仍然十分缺乏, 甚至 REEs 在目标植物组织中的含量分布特征也尚不十分清楚<sup>[2]</sup>. 因此, 有必要查明 REEs 在植物不同组织中的含量分布特征, 厘清 REEs 在不同植物生长过程中的作用机制, 为农作物种植过程中 REEs 的利用和控制提供理论依据. 基于此, 本文对云南大叶种普洱茶茶树不同组织 (根、茎、皮、花、果、鲜叶) 中 REEs 的含量及转移系数 (Translocation factors, TFs) 进行研究, 以期 REEs 在茶树生长过程中的作用机制研究提供数据支持.

## 1 方法与材料

### 1.1 样品的采集与制备

本研究以云南省临沧市临翔区大田河村的大叶种茶园为研究对象, 在茶园中选取最具代表性的大叶种茶树, 分别采集土壤 (茶树根围土壤, 深度为 20~50 cm) 以及茶树根、茎、皮、花、果和鲜叶 (一芽二至三叶) 样品. 土壤样品经风干、研磨至过 100 目孔筛后封装、贴标、备用, 茶树组织样品分别经自来水冲洗、去离子水冲洗、晾干、杀青 (100 °C)、研磨至过 60 目孔筛后封装、贴标、备用.

### 1.2 REEs 的测定

土壤样品和茶树各组织样品的微波消解: 准确称取 0.200 0 ~ 0.300 0 g 处理好的土壤样品和茶树各组织样品 (土壤样品研磨至 100 目, 茶树各组织样品研磨至 60 目) 于消解罐中, 加入 8~10 mL 浓 HNO<sub>3</sub> 静置过夜, 次日于 100 °C 赶酸仪中预消解后, 加盖放入微波消解仪中消解, 微波消解参数和步骤与缪德仁等<sup>[7]</sup> 所报道的一致. 消解液采用 ICP-MS 测定, 测定的方法和条件与郝伟等<sup>[14]</sup> 所报道的方法一致. 本研究所用试剂均为优级纯, 水为超纯水.

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤 REEs 的含量分布

采用微波消解-ICP-MS 分析方法对土壤样品中的 REEs 含量进行分析, 为了便于与其他研究结果之间进行比较, 本研究将 REEs 划分为轻稀土 (Light Rare earth elements, LREEs) 和重稀土 (Heavy Rare earth elements, HREEs) 两部分, 其中: LREEs 包含 6 个元素 (La, Ce, Pr, Nd, Sm 和 Eu); HREEs 包含 10 个元素 (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y 和 Sc). 对分析结果采用氧化物形式进行表示, 土壤中 LREEs 含量的分析结果列于表 1 之中.

表 1 大田河茶园土壤中 LREEs 的含量

元素 (氧化物)	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CeO <sub>2</sub>	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	32.400	108.000	9.210	28.300	7.060	1.251

土壤中 LREEs 含量的分析结果表明, 大田河茶园土壤中 LREEs 主要以 Ce, La 和 Nd 为主, 该 3 元素

氧化物含量之和占 LREEs 氧化物的总量的 90.59%. 土壤中 HREEs 含量的分析结果列于表 2 之中.

表 2 大田河茶园土壤中 HREEs 的含量

元素 (氧化物)	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
含量/(mg · kg <sup>-1</sup> )	6.370	0.952	5.180	1.314	3.350	0.502	3.160	0.504	29.000	17.800

土壤中 HREEs 含量的分析结果表明, 大田河茶园土壤中 HREEs 主要以 Y, Sc 和 Gd 为主, 该 3 元素氧化物含量之和占 HREEs 氧化物的总量的 78.04%. 稀土氧化物总量 (∑REEs) 远高于我国土壤背景值, 略高于凤庆县大寺乡茶园土壤. 轻重稀土氧化物含量的比值 (∑LREE/∑HREE) 为 2.733, 具有 HREEs 分馏, LREEs 富集的倾向. 16

种稀土元素氧化物含量的顺序基本符合“奥多-哈根斯法则”, 该结果与邱其俊<sup>[15]</sup>的研究结论一致.

## 2.2 茶树各组织中 REEs 的含量分布

采用微波消解-ICP-MS 分析方法对茶树各组织样品中的 LREEs 含量进行分析, 分析结果列于表 3 之中.

表 3 茶树各组织中 LREEs 的含量

茶树组织	轻稀土氧化物及含量/(μg · kg <sup>-1</sup> )						
	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CeO <sub>2</sub>	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	∑LREEs
根	540.00	420.00	90.20	284.00	76.70	22.10	1433.00
茎	792.00	644.00	127.00	403.00	116.00	31.90	2114.00
皮	6213.00	3231.00	981.00	3093.00	627.00	140.00	14285.00
花	199.00	283.00	22.80	72.70	15.00	4.32	597.00
果	18.80	26.90	2.09	7.64	1.81	0.34	58.00
鲜叶	1219.00	1286.00	212.00	718.00	202.00	67.50	3705.00
总量	8982.00	5891.00	1435.00	4578.00	1039.00	266.00	-

分析结果表明, 在茶树根、茎、皮、花、果和鲜叶中, 轻稀土氧化物总量 (∑LREEs) 由高到低的顺序为:  $w(\text{皮}) > w(\text{鲜叶}) > w(\text{茎}) > w(\text{根}) > w(\text{花}) > w(\text{果})$ , 茶树组织中各轻稀土元素氧化物总量之和的降序排列为:  $w(\sum \text{La}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{CeO}_2) > w(\sum \text{Nd}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{Pr}_6\text{O}_{11}) > w(\sum \text{Sm}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{Eu}_2\text{O}_3)$ . 但在茶叶鲜叶中, 各 LREEs 氧化物含量的降序排列为:  $w(\text{CeO}_2) > w(\text{La}_2\text{O}_3) > w(\text{Nd}_2\text{O}_3) > w(\text{Pr}_6\text{O}_{11}) > w(\text{Sm}_2\text{O}_3) > w(\text{Eu}_2\text{O}_3)$ ,

这与邱其俊<sup>[15]</sup>对福建典型茶园鲜叶中稀土元素含量分布调查研究结论完全一致. 从表 3 可以看出, 由于 La 在茶树皮层组织中的显著富集 (La 含量高达 6213.00 μg/kg) 是造成不同茶树组织中各轻稀土元素氧化物总量之和的排序与茶叶鲜叶中各 LREEs 氧化物含量排序不同的主要原因, 至于 La 在茶树皮层组织中异常富集的原因尚有待进一步深入研究. 对茶树不同组织中 HREEs 含量的分析结果汇总于表 4 之中.

表 4 茶树各组织中 HREEs 的含量

茶树组织	重稀土氧化物及含量/(μg · kg <sup>-1</sup> )										
	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	∑HREEs
根	85.900	9.670	45.100	9.710	20.400	2.610	15.000	2.040	0.247	0.032	191.000
茎	132.000	14.300	69.500	15.200	34.500	4.750	29.000	4.230	0.396	0.031	304.000
皮	818.000	83.000	372.000	79.500	171.000	19.100	99.400	14.500	2.190	0.111	1659.000
花	21.300	1.520	6.190	1.290	2.910	0.292	1.610	0.237	0.048	0.008	35.400
果	2.870	0.170	0.510	0.161	0.301	0.033	0.191	0.029	0.005	0.001	4.270
鲜叶	212.000	22.300	114.000	27.600	65.600	9.400	54.700	8.590	0.850	0.121	515.000
总量	1272.000	131.000	607.000	133.000	295.000	36.000	200.000	29.600	3.740	0.304	-

茶树不同组织中 HREEs 含量的分析结果表明, 在茶树根、茎、皮、花、果和鲜叶中, 重稀土氧化物总量( $\Sigma$  HREEs)由高到低的顺序为:  $w(\text{皮}) > w(\text{鲜叶}) > w(\text{茎}) > w(\text{根}) > w(\text{花}) > w(\text{果})$ , 这与  $\Sigma$  LREEs 的分布完全一致, 表明轻、重稀土元素在茶树不同组织中的分布并未呈现出明显的差异. 茶树组织中各重稀土元素氧化物总量之和的降序排列为:  $w(\Sigma \text{Gd}_2\text{O}_3) > w(\Sigma \text{Dy}_2\text{O}_3) > w(\Sigma \text{Er}_2\text{O}_3) > w(\Sigma \text{Yb}_2\text{O}_3) > w(\Sigma \text{Ho}_2\text{O}_3) > w(\Sigma \text{Tb}_4\text{O}_7) > w(\Sigma \text{Tm}_2\text{O}_3) > w(\Sigma \text{Lu}_2\text{O}_3) > w(\Sigma \text{Y}_2\text{O}_3) > w(\Sigma \text{Sc}_2\text{O}_3)$ . 总体而言, LREEs 和 HREEs 在茶树皮和茎中均呈现出显著的富集, 而

在茶树的花和果实中则呈现出明显的缺乏, 这可能与 REEs 在茶树体内的转运机制和茶树的生理特征有关.

### 2.3 REEs 在茶树各组织中的转移系数

转移系数 ( $TFs$ ) 可以定量描述元素从土壤至植物的迁移能力, 通常元素的  $TFs$  采用如下公式进行计算<sup>[16-17]</sup>:

$$TFs = \frac{\text{植体元素含量}}{\text{土壤元素含量}} \quad (1)$$

采用 (1) 式对 REEs 在茶树各组织中的  $TFs$  进行计算, 结果汇总于表 5 之中.

表 5 REEs 在茶树各组织中的转移系数

元素及分类	茶树组织及转移系数 $TFs/10^{-3}$						
	根	茎	皮	花	果	鲜叶	
LREEs	La	16.700	24.400	192.000	6.130	0.579	37.600
	Ce	3.850	5.910	29.600	2.600	0.247	11.800
	Pr	9.790	13.700	107.000	2.470	0.226	23.000
	Nd	10.000	14.300	109.000	2.570	0.270	25.400
	Sm	10.900	16.400	88.800	2.130	0.256	28.600
	Eu	17.700	25.500	112.000	3.450	0.273	53.900
HREEs	Gd	13.500	20.800	128.000	3.340	0.451	33.300
	Tb	10.200	15.000	87.200	1.600	0.178	23.400
	Dy	8.720	13.400	71.900	1.200	0.099	22.000
	Ho	7.390	11.600	60.500	0.980	0.122	21.000
	Er	6.090	10.300	51.100	0.868	0.090	19.600
	Tm	5.200	9.460	38.000	0.581	0.066	18.700
	Yb	4.760	9.190	31.500	0.509	0.060	17.300
	Lu	4.040	8.400	28.800	0.470	0.057	17.000
	Y	0.009	0.014	0.075	0.002	0.000	0.029
	Sc	0.002	0.002	0.006	0.000	0.000	0.007

从计算结果可以看出, 在茶树根部组织中, 转移系数最高的元素是 Eu 和 La, 转移系数分别为  $17.7 \times 10^{-3}$  和  $16.7 \times 10^{-3}$ , 最低的是 Sc 和 Y, 转移系数分别仅为  $0.002 \times 10^{-3}$  和  $0.009 \times 10^{-3}$ ; 在茶树茎 (去皮树干) 组织中, 转移系数最高的元素是 Eu 和 La, 最低的是 Sc 和 Y; 在茶树皮层组织中 La 的转移系数高达  $192 \times 10^{-3}$ , 在茶树鲜叶组织中 La 的转移系数也达  $37.6 \times 10^{-3}$ ; 而在茶树的花和果实组织中, 各稀土元素的转移系数均较低, 特别是在茶树果实组织中, 各稀土元素基本没有富集, 这与邱其俊<sup>[15]</sup>的研究结论一致. 总体而言, 在茶树各组织中, LREEs 的转移系数远高于

HREEs, 这充分表明, 土壤中的 LREEs 较 HREEs 具有更强的迁移性. 然而, 值得注意的是, 在茶叶鲜叶中, 除 Y 和 Sc 以外, 其余稀土元素的转移系数均较为接近, 说明轻、重稀土元素在土壤-茶树-鲜叶系统中的迁移能力无明显差异. 因此, 在茶叶稀土元素的风险评估中, 重稀土元素的风险也应引起高度的关注.

### 3 结论

通过以上研究可以获得如下结论:

1) 在茶树根、茎、皮、花、果和鲜叶中组织中,  $\Sigma$  LREE 和  $\Sigma$  HREE 由高到低的顺序为:

$w(\text{皮}) > w(\text{鲜叶}) > w(\text{茎}) > w(\text{根}) > w(\text{花}) > w(\text{果})$ 。

2) 茶树组织中各轻稀土元素氧化物总量之和的降序排列为:  $w(\sum \text{La}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{CeO}_2) > w(\sum \text{Nd}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{Pr}_6\text{O}_{11}) > w(\sum \text{Sm}_2\text{O}_3) > w(\sum \text{Eu}_2\text{O}_3)$ , 但在茶叶鲜叶中, 各 LREEs 氧化物的降序排列为:  $w(\text{CeO}_2) > w(\text{La}_2\text{O}_3) > w(\text{Nd}_2\text{O}_3) > w(\text{Pr}_6\text{O}_{11}) > w(\text{Sm}_2\text{O}_3) > w(\text{Eu}_2\text{O}_3)$ 。

3) 稀土元素在茶树皮层组织中的迁移系数最高, 而在花和果实中的迁移系数最低。在茶叶鲜叶中, 除 Y 和 Sc 以外, 其余稀土元素的迁移系数均较为接近, 说明轻、重稀土元素在土壤-茶树-鲜叶系统中的迁移能力无明显差异。

#### [参考文献]

- [1] TYLER G. Rare earth elements in soil and plant systems- A review [J]. *Plant and Soil*, 2004, 267: 191-206.
- [2] ADEEL M, LEE J Y, ZAIN M, et al. Cryptic footprints of rare earth elements on natural resources and living organisms [J]. *Environ Int*, 2019, 127: 785-800.
- [3] DAUMANN L. Essential and ubiquitous: the emergence of lanthanide metallobiochemistry [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2019, 58 (37): 12795-12802.
- [4] KARAK T, KUTU F R, NATH J R, et al. Micronutrients (B, Co, Cu, Fe, Mn, Mo and Zn) content in made tea (*Camellia sinensis* L.) and tea infusion with health prospect: a critical review [J]. *Criti Rev Food Sci*, 2017, 57 (14): 2996-3034.
- [5] GAO W, YAN M, XIAO Y, et al. Rinsing tea before brewing decreases pesticide residues in tea infusion [J]. *J Agr Food Chem*, 2019, 67 (19): 5384-5393.
- [6] 肖涵, 杨婉秋, 缪德仁. 云南省不同制茶品种不同产区茶多酚含量分析 [J]. *昆明学院学报*, 2016, 38 (6): 43-46.
- [7] 缪德仁, 李晓, 杨婉秋. 云南凤庆茶叶中铜、铅、锌、镉、铬和砷的健康风险评估 [J]. *昆明学院学报*, 2019, 41 (3): 56-60.
- [8] 谢佳, 缪德仁, 肖涵. 云南临沧大叶种茶稀土元素与游离氨基酸特征及相关性分析 [J]. *昆明学院学报*, 2019, 41 (6): 29-36.
- [9] KABATA-PENDIAS A. Trace elements in soils and plants [M]. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [10] NICODEMUS M A, SALIFU K F, JACOBS D F. Influence of lanthanum level and interactions with nitrogen source on early development of *Juglans nigra* [J]. *J Rare Earths*, 2009, 27: 270-279.
- [11] HU X, DING Z, WANG X, et al. Effects of lanthanum and cerium on the vegetable growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings [J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2002, 69: 727-733.
- [12] DIATLOFF E, SMITH F W, ASHER C J. Rare earth elements and plant growth; I. Effects of lanthanum and cerium on root elongation of corn and mung bean [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1995, 18: 1963-1976.
- [13] TURRA C, DE NADAI FERNANDES E A, BACCHI M A. Effects of lanthanum on citrus plant [J]. *Int J New Technol and Res*, 2015, 1 (7): 48-50.
- [14] 郝伟, 何咏, 陈雪, 等. 全自动消解-ICP-MS法检测不同茶叶中的稀土含量 [J]. *昆明学院学报*, 2016, 38 (3): 39-42.
- [15] 邱其俊. 福建典型茶园土壤-茶叶中金属元素分布特征及同位素示踪研究 [D]. 泉州: 华侨大学, 2018.
- [16] WICHE O, HEILMEIER H. Germanium (Ge) and rare earth element (REE) accumulation in selected energy crops cultivated on two different soils [J]. *Miner Eng*, 2016, 92: 208-215.
- [17] WICHE O, ZERTANI V, HENTSCHEL W, et al. Germanium and rare earth elements (REEs) in soils and soil grown plants in the area of Freiberg (Saxony, Germany) [J]. *J Geochem Explor*, 2017, 175: 120-129.

