

DOI: 10.20045/j.cnki.issn.2096-0220.2024.04.007

引文格式: 陈冰. 电感耦合等离子体发射光谱-内标法测定白茶中水溶性硅的含量 [J]. 茶叶学报, 2024, 65(4): 60–66.

电感耦合等离子体发射光谱-内标法测定白茶中水溶性硅的含量

陈 冰

(福建省测试技术研究所, 福建 福州 350003)

摘 要: 【目的】建立以电感耦合等离子体发射光谱-内标法测定白茶中水溶性硅含量的方法, 为研究白茶中的水溶性硅提供科学可靠的检测手段。【方法】白茶样品经粉碎、过 5.0 μm 标准筛, 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘干处理后, 首先进行不同内标元素(铱、铟、锗)与硅的不同分析谱线的选择实验, 并对称样量(1.00、2.00、3.00、4.00、5.00、6.00 g)、沸水浴浸提时间(20、40、60、90、120 min)等样品前处理条件进行优化。确定实验条件后, 样品经沸水浴浸提、过滤、加入内标元素、定容, 再采用电感耦合等离子体发射光谱法建立测定茶叶中水溶性硅含量的方法, 并从精密度、回收率等方面进行方法学考察及白茶样品的测定应用。【结果】选取内标元素铱(分析谱线 224.268 nm)与硅(分析谱线 288.158 nm)时, 检测结果的精密度及回收率最优。样品前处理最佳实验条件为称样量 4.00 g、沸水浴浸提时间 90 min。建立的电感耦合等离子体发射光谱-内标法的标准曲线线性良好, 相关系数大于 0.9999, 方法检出限为 7.5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 精密度相对标准偏差(RSD)为 1.53%, 样品加标回收率为 99.4%~104.8%。检测采集到的 10 个白茶样品, 其中白牡丹、寿眉各 4 个(存储时间分别为 1、3、7、10 年), 白牡丹(抛荒茶) 2 个(存储时间分别为 1、3 年), 结果显示寿眉随着存储年份的增加水溶性硅的含量呈现增长趋势, 而不同年份的白牡丹却保持相对稳定, 白牡丹(抛荒茶)水溶性硅的含量明显低于其他品类。【结论】该方法精密度好、检测结果可靠, 适用于白茶中水溶性硅含量的测定。不同白茶品类的水溶性硅含量有明显区别, 深入研究白茶中的水溶性硅, 为探寻白茶的保健功效及品质提升提供新的思路。

关键词: 电感耦合等离子体发射光谱法; 内标法; 水溶性硅; 白茶

中图分类号: S571.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-0220(2024)04-0060-07

Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry with Internal Standards for Water-Soluble Silicon Determination in White Tea

CHEN Bing

(Fujian Institute of Testing Technology, Fuzhou, Fujian, 350003, China)

Abstract: 【Objective】A method for determining the content of water-soluble silicon in white teas using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) with internal standards was developed. 【Method】The ICP-AES procedures were first optimized using the internal standards of iridium, indium, germanium, and silicon with 1.00, 2.00, 3.00, 4.00, 5.00, and 6.00 g sample weights in a boiling water bath for a 20, 40, 60, 90, or 120 min extraction. White tea samples were ground, filtered through a 5.0 μm sieve, and oven-dried at 80 $^{\circ}\text{C}$ for more than 4 h as a pretreatment prior to spiking the filtrate with the internal standards and making up to volume. Water-soluble silicon was determined by the optimized ICP-AES, and the results correlated to the standard curve. 【Result】The linearity of the silicon

收稿日期: 2024-06-11 初稿; 2024-08-16 修改稿

基金项目: 福建省省属公益类科研院所基本科研项目(2022R1006003)。

作者简介: 陈冰(1979-), 学士, 工程师, 研究方向: 光谱分析。E-mail: bc1049@126.com

measurement curve against iridium standard showed the highest correlation coefficient of greater than 0.999 9 with a detection limit of $7.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, a relative standard deviation (RSD) of 1.53%, and a recovery rate on spiked standards of 99.4%-104.8%. On the 10 white tea specimens, including 4 Baimudan and 4 Shoumei stored for one, 3, 7, and 10 years, and 2 Paohuang Baimudan (Baimudan tea made of leaves from bushes not plucked for years) stored for one and 3 years, the content of water-soluble silicon in Shoumei increased with increasing storage age, while Baimudan of different ages remained relatively constant; and that in Paohuang Baimudan was significantly lower than those in the others.

【Conclusion】 The newly developed ICP-AES assay was precise and reliable in detecting water-soluble silicon in white teas. It was considered adequate for the determination. By unveiling the differences in the content, in-depth studies on the health effect of varied white teas and quality improvement for new products were significantly facilitated.

Key words: Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy; internal standard method; water-soluble silicon; white tea

0 引言

【研究意义】我国是世界上最大的产茶国^[1]。茶叶种类较多,根据加工工艺可分为绿茶、红茶、白茶、黄茶、黑茶和乌龙茶六大茶类。白茶不炒不揉,制法独特,所制成茶白毫满披、色泽银白灰绿、汤色清淡^[2]。白茶初制分为萎凋和干燥两道工序,萎凋是其关键的加工工序,从而形成白茶特有的风味品质^[3]。白茶以清凉降火、抗氧化等功效和清新自然的风格,深受国内外广大消费者的喜爱^[4,5]。硅是地壳中除氧以外最多的元素,在自然界中多以二氧化硅和硅酸盐的形式存在^[6]。在水中, SiO_2 自身的溶解度极低,但在一定条件下可以形成多种水溶性硅酸,只有可溶于水的单体正硅酸才能被人和动物所吸收利用,因而它也被称为“生物活性硅酸”(Bioactive silicate),由于偏硅酸是所有硅酸中最基本的形式,因而常以偏硅酸来表征水中硅酸的浓度^[7]。硅是人体必需的微量元素之一,能使人体保持柔韧性,具有促进骨骼生长、维持动脉壁弹性、保护内壁膜的作用等。保持一定量的硅元素摄入有助于延长机体的衰老,如果人体的硅摄入量不足,会导致生长迟缓、器官萎缩、骨骼畸形^[8,9]。硅存在于各种蔬菜和粮食中,人们可以通过饮食摄取硅元素,但硅元素的吸收利用率却不足10%,现代人普遍缺乏硅元素^[10]。因此建立一种测定白茶中水溶性硅含量的方法,可为探究水溶性硅对白茶品质与功效研究提供基础数据支撑。**【前人研究进展】**目前利用电感耦合等离子体发射光谱法主要集中在对茶叶微量元

素检测上的研究,比如用电感耦合等离子体发射光谱法(Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, ICP-AES)和电感耦合等离子体质谱法(Inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定茶叶中Al、Ba和Ca等23种矿质元素的含量^[11],或者对茶叶中的稀土元素进行检测^[12]。有少部分研究是对茶汤中重金属含量的测定,比如测定茶汤中Cu、Fe和Mn等重金属元素的含量^[13],或者分析茶叶在不同浸泡条件下茶汤中Cd、Cr、Cu等10种重金属元素的溶出规律^[14]。对于硅与茶叶的研究也多集中在硅肥对茶叶生长的影响^[15]。目前针对水溶性硅的检测方法主要是测定水中偏硅酸的含量,比如国标GB/T 8538—2022《食品安全国家标准 饮用天然矿泉水检验方法》^[16]中规定的是硅钼黄光谱法和硅钼蓝光谱法,但该方法操作过程繁琐检测周期长,易受磷酸盐和有色基体的干扰,且标准要求要在15 min内完成全部样品的测定,难以满足现代分析发展的需要^[17]。此外,毛细管电泳-非接触式电导法^[18]、离子色谱法^[19,20]、流动注射法^[21]、高效液相色谱法^[22]、ICP-AES^[23]等也可直接测定矿泉水中的偏硅酸含量。**【本研究切入点】**本课题组已初步建立了测定白茶中全硅含量的ICP-AES法^[24]。水溶性硅能溶于茶汤从而影响白茶的品质,而且只有水溶性硅才能被人体吸收利用,因此建立白茶全硅中水溶性硅含量的测定方法,是对白茶中全硅研究的深入和拓展。然而目前文献中尚未见相关报道。**【拟解决的关键问题】**借鉴国标GB/T 8305—2013^[25]中浸提的相关方法,通过对称样量和浸提时间等样品前处

理条件进行优化,定容后再加入不同内标溶液,建立了测定茶叶中水溶性硅含量的 ICP-AES 方法,从精密度、回收率等方面进行了方法学考察,并应用该法测定 10 个白茶样品的水溶性硅含量。该方法操作简单、便于批量检测,填补了相关检测方法的空白。

1 材料与方 法

1.1 材料、主要仪器与试剂

材料:白茶样品 10 个,其中白牡丹 4 个、寿眉 4 个(存储年份分别为 1 年、3 年、7 年、10 年),白牡丹(抛荒茶)2 个(存储时间分别为 1 年、3 年),等级均为一级,市售。

仪器:电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES, Optima2100 DV, 美国 PerkinElmer 公司);超纯水系统(Milli-Q, 美国 Millipore 公司);马弗炉(SX₂-5-12, 1200℃, 上海曜进医疗器械厂);数显恒温水浴锅(HH-6, 上海红星仪器有限公司);电子天平(AL204-IC, 实际分度值:0.0001 g, 梅特勒-托利多仪器有限公司)。

试剂:硅元素标准品(1000 mg·L⁻¹, 国家有色金属及电子材料分析测试中心);铈元素标准品(1000 mg·L⁻¹, 国家有色金属及电子材料分析测试中心);高纯氩气(99.999%)。

1.2 方 法

1.2.1 样品制备

白茶样品经筛选去除杂质,粉碎过 5.0 μm 标准筛,装入洁净容器,临用前需放入烘箱中 80℃ 烘干 4 h 以上,置于干燥器中冷却后备用。

1.2.2 标准溶液配制

用高纯水将硅元素标准储备液逐级稀释,配制成浓度为 0、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00 mg·L⁻¹, 铈内标元素浓度为 1.00 mg·L⁻¹ 的标准溶液。

1.2.3 实验条件优化

不同内标元素及其分析谱线的选择:称取 6 份同一样品各 5.00 g(精确到 0.1 mg),加沸腾超纯水 120 mL,其中 3 份另加硅标准溶液(100 mg·L⁻¹) 1.00 mL,沸水浴浸提 120 min,过滤转移至 250 mL 容量瓶,加入内标元素铈(100 mg·L⁻¹)、铟(100 mg·L⁻¹)、锆(100 mg·L⁻¹)各 2.50 mL,定容后用 ICP-AES 检测。计算测定结

果的精密度及加标回收率,确定内标元素及与硅元素的分析谱线。

称样量的选择:分别称取同一样品 3 份各 1.00、2.00、3.00、4.00、5.00、6.00 g(精确到 0.1 mg),加沸腾超纯水 120 mL,沸水浴浸提时间 120 min,过滤转移至 250 mL 容量瓶,加入内标元素后定容,用 ICP-AES 检测。计算测定结果的精密度确定最佳称样量。

沸水浴浸提时间的选择:称取同一样品 3 份各 4.00 g(精确到 0.1 mg),加沸腾超纯水 120 mL,分别采用不同浸提时间(20、40、60、90、120 min)进行沸水浴浸提,过滤转移至 250 mL 容量瓶,加入内标元素后定容,用 ICP-AES 检测。计算测定结果的精密度确定最佳浸提时间。

1.2.4 ICP-AES 测定

仪器工作的参数:进样速率 1.5 mL·min⁻¹,载气流量 0.8 L·min⁻¹,辅助气流量 0.2 L·min⁻¹,冷却气流量 15 L·min⁻¹,积分时间 15 s,入射功率 1300 W。观测方式为轴向观测。分析谱线选择硅 288.158 nm、铈 224.268 nm。

1.2.5 样品测定

按照 1.2.3 确定的最佳称样量和沸水浴浸提时间进行提取(期间每隔 10 min 摇动一次)。浸提完毕后立即用 15 mm 定量快速滤纸过滤,转移至 250 mL 塑料容量瓶内,用约 100 mL 沸腾高纯水洗涤茶渣数次。滤液冷却至室温,加入 100.0 mg·L⁻¹ 内标元素铈标准溶液 2.50 mL,定容,用 ICP-AES 检测。

2 结果与分析

2.1 实验条件的选择

2.1.1 内标元素与分析谱线的选择

内标法是补偿附随物引起的非光谱干扰的有效方法,可使分析线相对强度与仪器操作条件的依赖关系变得不敏感,可以很好地校正一些物理因素,从而有效地提高分析结果的准确度和精密度,内标元素的浓度在 100 倍检出限时为最佳^[26]。本研究选取同一样品分别以硅(分析谱线 251.611、288.158 nm)与选择的 3 个内标元素铈(分析谱线 215.268、224.268 nm)、锆(分析谱线 209.426、265.118 nm)和铟(分析谱线 230.606、325.609 nm)及无内标情况下,做 3 个平行样计算精密度及 3 个

加标回收实验计算回收率。铈、锗、铟的检出限在 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 因此都选择内标元素浓度为 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。结果见表 1、表 2。结果看出, 选取硅

的分析谱线 288.158 nm , 内标元素选取铈及分析谱线为 224.268 nm 时, 检测结果的精密度及回收率最优。

表 1 不同内标元素及分析谱线精密度实验结果

Table 1 Precision of ICP-AES assay using different internal standards and measurement spectra

硅分析谱线 Silicon analytical spectral lines	测试次数 Number of tests	测试结果 Test result ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)						
		无添加内标元素 No added internal standard elements	内标元素及分析谱线 Internal standard elements and analytical spectral lines					
			铈 Ir		锗 Ge		铟 In	
			215.268 nm	224.268 nm	209.426 nm	265.118 nm	230.606 nm	325.609 nm
251.611 nm	1	31.7	24.9	27.9	26.5	27.8	27.6	21.0
	2	32.3	23.4	26.9	26.1	26.8	27.1	20.5
	3	31.5	23.2	26.7	25.9	26.4	26.8	20.5
	RSD (%)	1.31	3.90	2.37	1.17	2.67	1.49	1.40
288.158 nm	1	32.3	22.3	25.8	24.4	25.6	25.4	15.3
	2	34.9	21.4	25.9	25.3	25.7	26.2	15.8
	3	33.8	21.1	25.7	25.0	25.1	25.8	15.7
	RSD (%)	3.88	2.89	0.39	1.84	1.26	1.55	1.70

表 2 不同内标元素及分析谱线回收率实验结果

Table 2 Recovery rates of ICP-AES assay using different internal standards and measurement spectra

硅分析谱线 Silicon analytical spectral lines	测试次数 Number of tests	测试结果 Test result (%)						
		无添加内标元素 No added internal standard elements	内标元素及其分析谱线 Internal standard elements and analytical spectral lines					
			铈 Ir		锗 Ge		铟 In	
			215.268 nm	224.268 nm	209.426 nm	265.118 nm	230.606 nm	325.609 nm
251.611 nm	1	117.7	82.9	98.1	94.9	93.3	98.7	73.3
	2	118.6	89.1	102.0	87.4	94.1	97.1	80.2
	3	120.0	75.4	97.5	81.8	93.5	101.2	76.8
	平均值	118.8	82.5	99.2	88.0	93.6	99.0	76.8
288.158 nm	1	118.4	80.9	99.0	93.7	93.1	99.7	74.4
	2	119.6	87.4	103.0	83.9	93.1	96.6	81.1
	3	125.2	73.1	100.3	79.6	95.4	105.0	79.1
	平均值	121.1	80.5	100.8	85.7	93.9	100.4	78.2

2.1.2 称样量的选择

称样量的多少会影响实验过程的时长和检测结果的准确性。称样量太多会大幅增加样品浸提后过滤的时间; 称样量太少会使浸提过滤液中硅元素的浓度太低, 容易受仪器波动等影响。本研究分别称取同一样品 1.00、2.00、3.00、4.00、5.00、

6.00 g, 每个重量精确到 0.1 mg , 加沸腾超纯水 120 mL , 沸水浴浸提时间 120 min , 每个重量做 3 个平行样进行精密度实验。结果见表 3。从表 3 看出, 称样量大于 4.00 g 的检测结果比较稳定, 但称样量越多, 过滤时间也越长, 因此确定最佳称样量为 4.00 g (茶水比 $1:30$)。

表 3 不同称样量精密度实验结果

Table 3 Precision of assay using varied sample weights

测试次数 Number of tests	测试结果 (mg·kg ⁻¹) Test result					
	1.00 g	2.00 g	3.00 g	4.00 g	5.00 g	6.00 g
1	29.0	29.7	29.1	29.9	30.0	29.8
2	26.5	28.3	28.9	30.0	29.7	30.0
3	28.5	28.0	29.8	30.2	30.0	29.7
RSD (%)	4.72	3.17	1.61	0.51	0.58	0.51

2.1.3 沸水浴浸提时间的选择

沸水浴浸提的主要目的是要把样品中的水溶性硅完全溶解出来, 因此浸提时间要达到浸提充分的要求, 但又不能太长而影响整个实验过程。本研究分别对不同浸提时间 (20、40、60、90、

120 min) 进行实验, 每个浸提时间称取同一样品 4.00 g (精确到 0.1 mg) 做 3 个平行样计算精密度。结果见表 4。从表 4 看出, 浸提 90 min 后的检测结果趋于稳定, RSD 也较低, 因此确定最佳沸水浴浸提时间为 90 min。

表 4 不同沸水浴浸提时间精密度实验结果

Table 4 Precision of assay under varied extraction time in boiling water bath

测试次数 Number of tests	测试结果 (mg·kg ⁻¹) Test result				
	20 min	40 min	60 min	90 min	120 min
1	24.8	25.2	27.0	29.6	29.6
2	22.1	23.9	26.33	29.2	31.4
3	22.6	23.5	25.8	30.8	30.1
RSD (%)	6.20	3.67	3.28	2.79	3.06

2.2 标准工作曲线及检出限

用配制的系列标准溶液, 在上述选定的条件下进行仪器分析。以硅的浓度值为横坐标, 硅的特征分析谱线强度与内标元素铈的特征分析谱线强度比值为纵坐标绘制标准曲线。并且对空白溶液平行测定 11 次, 3 倍标准偏差得到检出限, 结果见表 5。由表 5 可以看出标准曲线线性关系良好, 检出限较低。

2.3 精密度及回收率实验

称取同一样品 10 份, 其中 5 份平行测定, 计算相对标准偏差; 另外 5 份做加标实验, 样品加入沸腾高纯水时添加标准样品溶液。精密度试验结果见表 6, 回收率试验结果见表 7。从表 6、表 7 看出, 相对标准偏差和回收率的试验结果都较好, 说明该方法准确、可靠。

表 5 回归方程、相关系数 R 及检出限

Table 5 Regression equation, correlation coefficient, and detection limit

线性回归方程 Linear regression equation	相关系数 R Correlation coefficient R	检出限 (n=11) (μg·L ⁻¹) Detection limit
$y=9.6163x+1.9619$	0.9999	7.5

表 6 精密度试验

Table 6 Assay precision

重复 5 次的测试结果 (mg·kg ⁻¹) The results of five repeated tests					平均值 (mg·kg ⁻¹) Average	RSD (%)
1	2	3	4	5		
40.0	39.2	40.4	39.4	40.6	39.9	1.53

表7 回收率试验

Table 7 Recovery rates on standards

样品编号 Sample number	原样量 (μg) Original sample amount	加标量 (μg) Added standard amount	测定总量 (μg) Determination of the total amount	回收率 (%) Recovery rate
1	160.5	150.0	309.6	99.4
2	160.4	150.0	317.6	104.8
3	160.4	150.0	315.7	103.5
4	160.5	150.0	311.3	100.5
5	160.6	150.0	314.8	102.8

2.4 白茶样品中水溶性硅的检测结果及与全硅结果的比较

采用 1.2.5 方法, 对市场购买的 10 个白茶样品进行水溶性硅含量检测, 并计算水溶性硅占全硅含量^[24]的百分比, 结果见表 8。从表 8 看出, 10 个白茶样品的水溶性硅含量为 10~35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,

差异较大, 其中寿眉含量较高且随着年份的增加呈现升高趋势, 不同年份白牡丹样品却保持相对稳定, 两个抛荒茶样品明显低于其他品类。水溶性硅占全硅的百分比与存储年份的变化没有明显的相关规律; 但从品类来看, 寿眉的占比最大、其次是白牡丹、抛荒茶最小。

表8 白茶样品的水溶性硅、全硅含量及其二者比值

Table 8 The contents of water-soluble silicon and total silicon in white tea samples and their ratios

样品名称 Sample name	水溶性硅含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Water-soluble silicon content	全硅含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Total silicon content	水溶性硅占全硅的百分比 (%) The percentage of water-soluble silicon in total silicon
白牡丹 1 年	27.0 \pm 0.23	250 \pm 3.4	10.8
白牡丹 3 年	24.4 \pm 0.32	193 \pm 2.4	12.6
白牡丹 7 年	23.7 \pm 0.44	212 \pm 1.2	11.2
白牡丹 10 年	23.8 \pm 0.40	297 \pm 1.1	8.0
寿眉 1 年	28.2 \pm 0.51	144 \pm 2.1	19.6
寿眉 3 年	31.2 \pm 0.26	119 \pm 2.0	26.2
寿眉 7 年	33.0 \pm 0.13	178 \pm 3.1	18.5
寿眉 10 年	34.6 \pm 0.52	196 \pm 2.9	17.7
白牡丹 (抛荒茶) 1 年	10.4 \pm 0.30	214 \pm 3.5	4.9
白牡丹 (抛荒茶) 3 年	19.0 \pm 0.20	191 \pm 1.1	9.9

3 结论

将白茶样品按茶水比 1:30 经沸水浴浸提 90 min、滤纸过滤后, 再以 ICP-AES-内标法测定水溶性硅的含量, 所得的标准曲线线性关系良好, 相关系数大于 0.999 9; 检出限为 7.5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 精密度相对标准偏差 (RSD) 为 1.52%, 回收率为 99.4%~104.8%, 表明该方法精密度好、检测结果可靠。该法填补了白茶中水溶性硅含量的分析检测空白, 为白茶价值研究拓展了新领域。从采集

的白茶样品检测结果看出, 寿眉的水溶性硅含量较高且随着年份的增加呈现升高趋势, 而不同年份白牡丹样品保持相对稳定, 两个抛荒茶样品明显低于其他品类; 从水溶性硅占全硅的百分比来看, 寿眉明显高于白牡丹及抛荒茶。偏硅酸的存在会为水质口感带来甘甜味, 对口感的改善有益处^[27], 这可能是寿眉口感上更为甘冽的原因之一。

参考文献

- [1] 王莅横. 中国茶叶出口贸易竞争力的研究[D]. 北京: 首都经

- 济贸易大学, 2015.
- [2] 施兆鹏. 茶叶加工学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [3] 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [4] 王春燕. 白茶的风味及抗氧化性的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [5] 戴伟东, 解东超, 林智. 白茶功能性成分及保健功效研究进展[J]. *中国茶叶*, 2021, 43(4): 1-8.
- [6] 史鹤, 胡敏予. 食物中硅含量及相关健康效应研究进展[J]. *中国老年学杂志*, 2016, 36(18): 4669-4671
- [7] 杨岫青, 孙杉. 中国新生代玄武岩含硅酸重碳酸型水的分布及形成机制[J]. *石家庄经济学院学报*, 1988(1): 45-58.
- [8] ABRAHAM G E. The importance of bioactive silicates in human health[J]. *The Original Internist*, 2005, 3: 13-19.
- [9] 高喜凤, 董瑞, 刘艳明, 等. 食用盐中硅的测定[J]. *中国调味品*, 2019, 44(7): 138-140, 150.
- [10] 陈均洪, 容斌权. 电感耦合等离子质谱法检测保健食品中的硅[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(14): 4761-4764.
- [11] 王小平, 马以瑾, 伊藤光雄. 密封消解 ICP-AES 和 ICP-MS 测定中日两国茶叶中 23 种矿质元素[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005(10): 169-173.
- [12] 马爱英, 刘卫东. 微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法测定茶叶中 16 种稀土元素及不同发射波长对回收率的影响[J]. *中国卫生检验杂志*, 2017, 27(8): 1091-1094.
- [13] 姚剑亭, 吴凯健, 杨伟球. ICP-AES 法测定茶汤中重金属的方法研究[J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(8): 112-114.
- [14] 杨钦沾, 陈孟君, 温恒, 等. 茶叶中 10 种重金属浸出率[J]. *福建农业学报*, 2015(4): 406-410.
- [15] 杨淑清, 张丽霞, 崔林海, 等. 喷施硅肥对茶树生长及硅素分布的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(4): 712-721.
- [16] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 8538—2022 食品安全国家标准 饮用天然矿泉水检验方法[S]. 北京: 国家标准出版社, 2022.
- [17] 赵雯玮, 刘吉爱, 朱红波, 等. ICP-MS/ICP-AES 测定水中偏硅酸含量[J]. *检验检疫学刊*, 2017, 27(1): 10-12.
- [18] 李二庭, 杨丽蓉, 黄文惠, 等. 毛细管电泳-非接触式电导法直接测定偏硅酸[J]. *分析化学*, 2011, 4(39): 568-571.
- [19] 高翔, 杨兰玲, 姜明洪, 等. 非抑制型离子色谱法测定矿泉水中偏硅酸[J]. *饮料工业*, 2013, 12(16): 31-32, 38.
- [20] 李莎, 汪辉, 胡丽俐, 等. 抑制型离子色谱法测定矿泉水中的偏硅酸[J]. *食品科技*, 2014, 9(39): 295-299.
- [21] 李永生, 高秀峰. 同时测定磷酸盐/硅酸盐流动注射分析系统的研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2008, 4(40): 62-65.
- [22] YOKOYAMA Y, DANNO T. Simultaneous determination of silicate and phosphate in environmental waters using pre-column derivatization Ion -pair liquid chromatography[J]. *Talanta*, 2009, 79(2): 308-313.
- [23] 姜莹, 张世涛, 邵文军. 饮用天然矿泉水中偏硅酸(H_2SiO_3)的测定[J]. *饮料工业*, 2005(6): 38-41.
- [24] 陈冰. 电感耦合等离子体发射光谱法测定白茶中硅的含量[J]. *茶叶学报*, 2024, 65(1): 62-66.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 茶水浸出物测定: GB/T 8305—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [26] 刘伟, 张殿英, 赵桂芬. ICP-AES 内标法测定硅铝钡中 Al、Ba 等 9 种元素含量的试验研究[J]. *冶金标准化与质量*, 2006(4): 9-12.
- [27] 侯明韬, 刘晓婧, 许一鸣, 等. 饮用水中矿物成分分布特征及其对口感的影响[J]. *环境影响评价*, 2021, 43(6): 73-77, 84.