

电感耦合等离子体质谱法测定黑龙江省主要粮食产区灌溉水中 27 种元素

赵 薇¹, 邹春苗², 刘静晶², 孙汉伟², 刘长福², 赵 岚^{1,2*}

(1. 哈尔滨工业大学化工与化学学院, 哈尔滨 150001; 2. 黑龙江省疾病预防控制中心, 哈尔滨 150030)

摘 要: **目的** 建立电感耦合等离子体质谱法测定灌溉水中 27 种元素, 并对黑龙江省主要粮食产区灌溉水进行分析测定。**方法** 优化电感耦合等离子体质谱仪的工作参数, 以 ^6Li 、 ^{45}Sc 、 ^{72}Ge 、 ^{115}In 、 ^{209}Bi 作为内标元素, 水样经 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤后, 采用电感耦合等离子体质谱法进行测定。**结果** 通过对仪器各项参数进行优化, 有效克服了各种干扰的影响, 方法的精密度、线性范围及回归系数等各项指标均符合标准要求, 相关系数 r 均大于 0.999, 检出限为 $0.0010\sim 0.56\ \mu\text{g/L}$, 定量限为 $0.0033\sim 1.9\ \mu\text{g/L}$ 。各元素加标回收率在 $84.1\%\sim 104.9\%$ 之间, 测定结果相对标准偏差在 $0.07\%\sim 4.5\%$ 之间。**结论** 该方法简单、快速、准确, 适用于灌溉用水中多元素测定。

关键词: 电感耦合等离子体质谱法; 多元素; 灌溉水; 粮食产区

Determination of 27 elements in irrigation water of major grain producing areas in Heilongjiang by inductively coupled plasma mass spectrometry

ZHAO Wei¹, ZOU Chun-Miao², LIU Jing-Jing², SUN Han-Wei², LIU Chang-Fu², ZHAO Lan^{1,2*}

(1. College of Chemical Engineering and Chemistry, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Heilongjiang Center for Disease Control and Prevention, Harbin 150030, China)

ABSTRACT: Objective To establish a method for the determination of 27 elements in irrigation water by inductively coupled plasma mass spectrometry, and to analyze and determine the irrigation water in major grain producing areas of Heilongjiang province. **Methods** The working parameters of inductively coupled plasma mass spectrometry were optimized. ^6Li , ^{45}Sc , ^{72}Ge , ^{115}In and ^{209}Bi were used as internal standard elements. The water samples were filtered by $0.45\ \mu\text{m}$ filter membrane and then determined by inductively coupled plasma mass spectrometry. **Results** The instrument parameters were optimized to effectively overcome various disturbances, and the method indicators, such as the precision, the linear range as well as the regression coefficients, were consistent with the standards. The correlation coefficients were all greater than 0.999. The detection limits were obtained between $0.0010\sim 0.56\ \mu\text{g/L}$, and the limits of quantification were between $0.0033\sim 1.9\ \mu\text{g/L}$. The recovery rates were between $84.1\%\sim 104.9\%$, with the relative standard deviations between $0.07\%\sim 4.5\%$. **Conclusion** The established

基金项目: 黑龙江省卫生计生委科研课题(2017-529)、黑龙江省卫生健康委科研课题(2020-202)

Fund: Supported by Heilongjiang Scientific Research Project (2017-529), and Heilongjiang Scientific Research Project (2020-202)

*通讯作者: 赵岚, 博士, 主任医师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: zhaolan75@163.com

*Corresponding author: ZHAO Lan, Ph.D, Chief Physician, Heilongjiang Center for Disease Control and Prevention, No.40, Youfang Road, Xiangfang District, Harbin 150030, China. E-mail: zhaolan75@163.com

method is simple, rapid, and accurate, which is applicable to the determination of elements in water of irrigation water.

KEY WORDS: inductively coupled plasma mass spectrometry; irrigation water; multi-elements; grainproducing areas

1 引言

随着工业和城市的迅速发展,一些污水在排出的时候携带有不同程度的重金属物质,这些金属物质掺杂在环境水体中,在参与灌溉的过程中会造成灌溉区域土壤污染和农产品中重金属超标,给人体健康带来严重的危害^[1-3]。黑龙江省为我国重要的粮食产区,水稻种植面积近 6000 万亩,其灌溉水中的重金属分布状况严重影响水稻中的重金属含量,因此加强对粮食产区灌溉水的监测,确保灌溉水水质安全,对保障人民身体健康具有极其重要的意义。

我国关于灌溉水元素检测方法多采用化学法、原子吸收光谱法、原子荧光光谱法^[4-6]。但这些方法存在一定的局限性,即样品预处理繁琐,只能对单元素逐个测定,速度慢、效率低,且线性范围较窄,精密度较差。王艳泽等^[7]采用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma source mass spectrometry, ICP-MS)测定土壤和灌溉水样品中 6 种元素;吴开华等^[8]采用电感耦合等离子体质谱法测定灌溉水中 7 种重金属。与常规的元素测试方法相比,电感耦合等离子体质谱法具有分析速度快、灵敏度高、精密度和准确度好、线性范围宽等优点^[9-12]。

目前,我国灌溉水的元素检测技术主要是 6~8 种元素的同时测定,针对这种情况,本研究建立电感耦合等离子体质谱法同时测定灌溉水中 27 种元素,并对黑龙江省主要粮食产区灌溉水进行分析测定,为灌溉水水质监测提供可靠的技术支撑,初步了解黑龙江省内主要粮食产区灌溉水的元素分布情况,为后续相关研究奠定基础。

2 材料与方法

2.1 仪器与试剂

iCAP Q 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo 公司); CP324S 万分之一电子天平(德国 Sartorius 公司); Milli-Q Academic 超纯水机(美国 Millipore 公司)。

混合标准贮备液(Ca、Fe、K、Mg、Na、Ag、Al、Be、Pb、Cd、Co、Cr、Cu、As、Se、Mn、Ba、Zn、Mo、Ni、Sb、Th、Tl、V、U)(浓度为 1000 mg/L,美国 Aglient 公司);汞(Hg)元素标准溶液、锂(Li)元素标准溶液(浓度为 1000 mg/L,中国科学计量研究院);水体标准物质(环境保护部标准样品研究所);质谱调谐液(Be、Ce、Fe、In、Li、Mg、Pb、U)(浓度为 1 μg/L,美国 Thermo 公司);内标为单

标贮备液(Bi、Sc、Ge、In)(浓度 1000 μg/L,美国 Aglient 公司);实验用水为去离子水,电阻率 $\geq 18.2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ 。

2.2 水样采集

黑龙江省内主要的 5 大流域包括松花江流域、嫩江流域、牡丹江流域、黑龙江流域和乌苏里江流域,引流灌溉是黑龙江省农田灌溉的主要途径。本研究在松花江、嫩江、牡丹江、黑龙江和乌苏里江流域的哈尔滨段、绥化段、佳木斯段、鹤岗段、伊春段、齐齐哈尔段、牡丹江段、双鸭山段、鸡西段、七台河段设置监测点位,按照《农用水源环境质量监测技术规范》中样品采集和保存要求进行采样保存,采集完毕立刻送实验室检测。

2.3 实验方法

2.3.1 仪器条件

RF 功率: 1550 W,模拟电压: 1925 V,脉冲电压: 1175 V,碰撞气(He)流速: 4.0 L/min,雾化器(Ar)流速: 1.05 L/min,冷却气(Ar)流速: 14 L/min,辅助气(Ar)流速: 0.8 L/min,采样深度: 5.0 mm,蠕动泵速: 40 r/min,取样时间: 45 s。

2.3.2 标准溶液配制和内标配制

Li 标准系列: 使用 5%硝酸溶液将锂标准溶液逐级稀释,配制称所需浓度 0.0、5.0、10.0、20.0、50.0、100.0 μg/L。

Hg 标准系列: 采用 2% HNO₃ 和 5% HCl 逐级将 Hg 单元素标准溶液稀释,配制成所需浓度 0.00、0.05、0.10、0.50、1.00、2.00 μg/L。

混合标准系列: 使用 5%硝酸溶液将混合标准溶液逐级稀释,配制成所需浓度,其中 Ca、Fe、K、Mg、Na 的浓度为 0.0、0.5、1.0、2.0、5.0、10.0 mg/L; Ag、Al、Be、Pb、Cd、Co、Cr、Cu、As、Se、Mn、Ba、Zn、Mo、Ni、Sb、Th、Tl、V、U 的浓度为 0.0、5.0、10.0、20.0、50.0、100.0 μg/L。

内标溶液: 采用超纯水将内标溶液进行 100 倍稀释,配制成浓度为 10 ng/mL 的溶液。

2.3.3 样品测定

将灌溉水待测水样经 0.45 μm 滤膜过滤,弃去 50 mL 初始溶液,去除水样中有机物及大颗粒物质的干扰,然后收集实验用滤液并用 HNO₃ 调节 pH < 2。在线引入内标,内标液管与进样液管通过三通阀 1:1 在线加入。按照仪器优化后设定的方法,将试剂空白、标准系列、样品溶液按照进样顺序引入仪器,进行分析测定。

3 结果与分析

3.1 干扰及消除

ICP-MS 的干扰分为质谱干扰和非质谱干扰。质谱干扰主要有同量异位素重叠、多原子或加合物离子、难溶氧化物离子、双电荷离子等干扰,可采用优化仪器条件等方法消除^[13]。在实验前,为确保检测的准备性和灵敏度,应首先进行质谱条件优化,选用 1.0 μg/L 调谐液(Ba、Bi、Ce、Co、In、Li、U)进行调谐,优化 ICP-MS 参数,包括载气流速、采样深度和炬管位置等,使灵敏度、氧化物比率、双电荷比率均符合实验要求。

非质谱干扰主要是样品基体。稀释样品、内标校正、

标准加入和基体消除是克服基体效应最有效的方法^[14]。内标法内标元素的选择应是样品中不存在,与所测元素的质量数尽量相近,电离能尽量相近,沸点相近的元素。为了降低基体干扰,较少校正信号漂移,并要满足不同测定元素的需要,实验选择了 ⁶Li、⁴⁵Sc、⁸⁹Y、¹¹⁵In、¹⁵⁹Tb 和 ²⁰⁹Bi 6 种内标元素,用于校正不同质量数的元素。

3.2 线性范围及检出限、定量限

测定配制的标准溶液系列,得到各元素相关系数 *r* 均大于 0.999,线性良好。根据检出限测定方法,连续测定样品空白溶液 11 次,计算各元素的标准偏差,以 3 倍标准偏差所对应的元素浓度为方法检出限,以 10 倍标准偏差所对应的元素浓度为方法定量限。结果见表 1。

表 1 各元素相关系数、检出限及定量限
Table 1 Linear correlations, detection limits and quantification limits of trace elements

元素	质量数	线性方程	相关系数 (<i>r</i>)	检出限/(μg/L)	定量限/(μg/L)
Li	7	Y=10.6889X+0.0534	1.0000	0.068	0.23
Be	9	Y=52.0297X+2.1436	1.0000	0.026	0.086
Na	23	Y=381684.6263X+5586.2547	0.9997	0.52	1.7
Mg	24	Y=159770.2891X+117.7785	1.0000	0.31	1.0
Al	27	Y=38.0226X+17.2223	0.9999	0.19	0.62
K	39	Y=86098.7307X+2060.7286	0.9995	0.41	1.4
Ca	44	Y=5887.6646X+343.8941	1.0000	0.56	1.9
V	51	Y=2912.7202X+33.8890	0.9995	0.0057	0.019
Cr	52	Y=4520.5563X+29.4445	0.9995	0.0057	0.019
Mn	55	Y=1864.7209X+65.0003	0.9998	0.0088	0.029
Fe	57	Y=94241.6516X+53.8912	0.9992	0.43	1.4
Co	59	Y=8753.6792X+11.1111	1.0000	0.0016	0.0053
Ni	60	Y=2360.1951X+182.2238	0.9998	0.0020	0.0067
Cu	63	Y=6521.6934X+173.8906	0.9998	0.0033	0.011
Zn	66	Y=1244.9839X+364.4504	0.9997	0.011	0.038
Ag	107	Y=18538.1773X+200.0019	1.0000	0.0010	0.0033
Cd	111	Y=2756.6729X+2.2222	1.0000	0.0017	0.0057
Sb	121	Y=4683.9428X+4020.0972	0.9997	0.023	0.076
Ba	137	Y=1752.7113X+31.1112	1.0000	0.011	0.036
As	75	Y=451.7623X+3.8889	1.0000	0.026	0.087
Se	77	Y=20.1499X+8.3333	0.9999	0.35	1.2
Mo	95	Y=4018.1770X+4.4445	0.9995	0.0012	0.0040
Hg	202	Y=10585.0670X+197.7797	0.9993	0.0089	0.030
Tl	205	Y=77468.49.4902X+37.7779	0.9999	0.0011	0.0033
Pb	208	Y=54094.1197X+1316.7448	1.0000	0.0047	0.016
Th	232	Y=103872.5482X+38.8890	1.0000	0.002	0.0067
U	238	Y=122602.5285X+99.4451	0.9997	0.002	0.0067

3.3 回收率及精密度实验

以纯水作空白, 分别加入高、中、低 3 个浓度的混合标准溶液。测得的回收率在 84.1%~104.9%之间, 相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)在 0.07%~4.5%之间。见表 2。

3.4 标准物质测定

为进一步验证本方法的准确性, 将有证标准物质按

要求稀释后, 对每份样品进行 6 次平行测定并取平均值, 测定值均在标准值范围内, 结果见表 3。

3.5 主要粮食产区灌溉水的测定

分别采集黑龙江省内松花江、嫩江、牡丹江、黑龙江、乌苏里江 5 个主要流域粮食产区灌溉水样本各 12 份, 共计 60 份, 进行分析测定。不同区域灌溉水中元素平均含量见表 4。

表 2 方法回收率及精密度(n=7)
Table 2 Recoveries and precision of the method (n=7)

元素	加标量/(μg/L)	回收率/%	RSD/%	加标量/(μg/L)	回收率/%	RSD/%	加标量/(μg/L)	回收率/%	RSD/%
Li	5	99.0	2.5	20	98.9	2.8	50	104.1	2.8
Be	5	94.6	2.2	20	98.0	3.5	50	98.2	2.3
Na	0.5	95.8	1.9	2	94.8	3.1	5	97.7	4.5
Mg	0.5	93.8	2.4	2	99.7	3.8	5	99.9	3.0
Al	5	93.4	1.8	20	98.7	0.59	50	97.2	2.2
K	0.5	92.5	1.3	2	100.3	1.0	5	100.0	3.5
Ca	0.5	96.2	3.0	2	99.8	1.9	5	99.5	2.8
V	5	84.1	2.7	20	95.4	1.6	50	94.8	1.6
Cr	5	86.8	0.33	20	91.8	1.3	50	97.9	2.4
Mn	5	86.2	0.84	20	89.0	2.2	50	99.9	2.5
Fe	0.5	88.9	2.1	2	92.5	2.1	5	95.3	0.77
Co	5	94.6	0.31	20	98.2	1.5	50	99.8	0.79
Ni	5	92.2	0.44	20	99.0	3.3	50	99.9	3.9
Cu	5	86.7	0.25	20	99.1	0.21	50	98.7	1.7
Zn	5	93.3	1.1	20	100.7	0.29	50	101.4	2.2
Ag	5	95.1	1.9	20	101.2	0.27	50	100.9	2.5
Cd	5	97.2	1.8	20	99.4	0.10	50	100.3	1.4
Sb	5	98.6	0.07	20	96.1	0.13	50	97.6	1.7
Ba	5	90.1	0.11	20	99.0	0.20	50	102.8	1.2
As	5	87.9	0.13	20	94.3	1.83	50	99.2	2.1
Se	5	91.4	3.3	20	96.3	2.8	50	98.3	3.8
Mo	5	92.7	2.2	20	86.6	2.7	50	90.2	3.1
Hg	5	85.7	1.9	20	92.7	0.12	50	91.6	0.23
Tl	5	88.6	2.5	20	98.5	0.22	50	95.7	0.72
Pb	5	99.7	1.9	20	99.4	0.72	50	100.7	0.63
Th	5	86.4	1.5	20	95.1	3.3	50	92.8	2.4
U	5	101.7	3.2	20	102.3	3.0	50	104.9	2.5

表 3 标准物质检测结果
Table 3 Determination of standard reference material

证书编号	元素	标准值/(mg/L)	测定均值/(mg/L)	RSD/%
Inorganic ventures	Be	0.832±0.005	0.833	1.3
GSB07-3185-2014	Na	1.30±0.05	1.29	1.1
GSBZ 50020-9002602	Mg	0.50±0.03	0.51	2.4
Inorganic ventures	Al	3.952±0.021	3.945	0.33
GSBZ 50020-9002602	K	1.50±0.08	1.53	1.4
GSB07-3185-2014	Ca	2.03±0.11	2.12	1.7
Inorganic ventures	V	1.872±0.009	1.870	2.1
GSBZ 50009-88 200926-09A	Cr	0.496±0.025	0.483	1.6
GSB07-1189-2000	Mg	0.603±0.029	0.608	0.60
GSB07-1188-2000	Fe	0.491±0.034	0.515	2.0
Inorganic ventures	Co	0.936±0.005	0.933	1.2
GSB07-1186-2000	Ni	0.651±0.030	0.678	1.1
GSBZ 50009-88 200926-09A	Cu	1.10±0.04	1.07	2.8
GSB07-1184-2000	Zn	0.356±0.016	0.359	2.5
Inorganic ventures	Ag	0.927±0.005	0.920	0.09
GSBZ 50009-88 200926-09A	Cd	0.113±0.005	0.113	0.41
GSB07-1376-200104902	Sb	2.01±0.15	2.15	3.5
GSBZ 50039-95	Ba	1.00±0.08	1.07	1.9
GSB 5004-88	As	0.152±0.008	0.160	0.42
GSB 50031-94	Se	6.94±0.95	7.35	0.75
Inorganic ventures	Tl	0.824±0.006	0.830	0.29
GSB07-1183-2000	Pb	0.299±0.017	0.302	2.7

表 4 不同区域灌溉水中元素平均含量
Table 4 Average contents of elements in irrigation water in different regions

元素名称	松花江流域	乌苏里江流域	牡丹江流域	黑龙江流域	嫩江流域
Ca/(mg/kg)	40.0	17.3	18.7	41.5	35.8
Na/(mg/kg)	12.1	5.52	10.5	14.1	25.0
Mg/(mg/kg)	6.01	4.43	5.58	8.10	13.0
K/(mg/kg)	2.94	2.40	1.78	4.68	6.95
Fe/(mg/kg)	1.19	0.554	0.502	0.963	1.85
Mn/(μg/kg)	74.1	92.8	12.4	31.7	47.7
Zn/(μg/kg)	19.2	11.7	27.7	13.5	13.4
Cu/(μg/kg)	14.7	16.1	27.8	29.7	35.6
Mo/(μg/kg)	0.605	0.725	2.05	1.09	1.31
Co/(μg/kg)	0.253	0.331	0.0954	0.796	1.69
Se/(μg/kg)	0.201	0.248	0.264	0.778	0.649

续表 4

元素名称	松花江流域	乌苏里江流域	牡丹江流域	黑龙江流域	嫩江流域
Cr/(μg/kg)	3.26	1.75	2.41	6.87	11.9
Pb/(μg/kg)	0.649	0.956	1.07	1.18	2.99
As/(μg/kg)	1.89	4.52	0.724	3.28	1.94
Cd/(μg/kg)	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300
Hg/(μg/kg)	0.0350	0.0350	0.0350	0.0350	0.0350
Th/(μg/kg)	0.500	0.187	0.202	0.181	0.267
U/(μg/kg)	0.299	0.278	0.386	0.381	0.644
Tl/(μg/kg)	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	0.0100
Ag/(μg/kg)	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300
Al/(μg/kg)	251	115	81.9	495	500
Ba/(μg/kg)	281	13.1	40.5	69.6	101
V/(μg/kg)	1.36	1.24	0.530	1.62	2.54
Be/(μg/kg)	0.0683	0.0507	0.0300	0.103	0.129
Sb/(μg/kg)	2.16	4.32	1.32	1.90	3.11
Ni/(μg/kg)	1.06	0.887	1.02	2.10	12.6
Li/(μg/kg)	3.12	2.82	6.01	8.60	19.8

注: *未检出按检出限一半计算。

4 结论与讨论

黑龙江省主要产区粮食灌溉水检测结果显示, 省内 5 大流域灌溉水元素含量相对一致, 分布整体情况是常量元素(Ca、Na、Mg、K)明显高于微量元素(Fe、Mn、Cu、Zn、Mo、Co、Se)。常量元素平均含量均呈现如下趋势: Ca > Na > Mg > K, 此趋势与我国汉江上游金水河流域及太湖北部流域分布情况一致^[15,16]; 微量元素的分布整体呈现如下趋势: Fe > Mn > Cu > Zn > Mo > Co > Se, 但乌苏里江流域 Co 的含量高于 Mo。5 大流域灌溉水中毒理性元素 Cd、Hg、Cr、As、Pb 均符合我国《农田灌溉水质标准》^[17], 其他毒理性元素 Tu、U、Tl、Ag 含量均较低或未检出。此外, 黑龙江省五大流域中 Al、Ba、V 分布情况与汉江上游金水河流域相符, 趋势为: Al > Ba > V。

本研究建立的 ICP-MS 法同时测定了黑龙江省内主要粮食产区灌溉水中 27 种元素, 并对 ICP-MS 条件进行优化, 方法的检出限、回收率和精密度均能满足灌溉水样品分析的要求。该方法操作简便、快速、准确、可靠, 灵敏度高, 适用于粮食灌溉水中 27 种元素的同时测定。

参考文献

[1] Meng X, Ai Y, Li R, *et al.* Effects of heavy metal pollution on enzyme activities in railway cut slope soils [J]. *Environ Monit Assess*, 2018, 190(4): 197.

[2] Tatsuta N, Kurokawa N, Nakai K, *et al.* Effects of intrauterine exposures to polychlorinated biphenyls, methylmercury, and lead on birth weight in Japanese male and female newborns [J]. *Environ Health Pre Med*, 2017, 22(1): 39.

[3] Warchilová T, Vaculovic T, Matal O, *et al.* Lateral mapping of metallic materials using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Chem Listy*, 2012, 106(3): 236–239.

[4] 陈艳丽. 平凉市蔬菜产地灌溉水源重金属含量检测与评价[J]. *甘肃农业科技*, 2005, 6: 36–38.

Chen YL. Detection and evaluation of heavy metal contents in irrigation water vegetable growing area of Pingliang city [J]. *Gansu Agric Sci Technol*, 2005, 6: 36–38.

[5] 邹日, 高苹, 柏新富, 等. 山东芋主产区的重金属检测及影响因素分析 [J]. *中国蔬菜*, 2014, 4: 14–20.

Zou R, Gao P, Bai XF, *et al.* Heavy metal detection and analysis of influence factors in main taro production areas of Shandong province [J]. *China Veget*, 2014, 4: 14–20.

[6] 栗婷, 汪庆华, 黄东亚. 西安市农业产地环境农田灌溉水重金属污染评价[J]. *黑龙江农业科学*, 2018, 11: 94–96.

Li T, Wang QH, Huang DY. Evaluation of heavy metal pollution in farmland irrigation water of agricultural areas in Xi'an city [J]. *Heilongjiang Agric Sci*, 2004, 40(11): 661–663.

[7] 王艳泽, 施燕支, 王英锋, 等. ICP-MS 对土壤和灌溉水样品中部分微量元素测定[J]. *首都师范大学学报*, 2006, 27(2): 46–49.

Wang YF, Shi YZ, Wang YF, *et al.* Study on the method for the determination of some trace elements in soil and water sample by ICP-MS

- [J]. J Cap Nor Univ, 2006, 27(2): 46–49.
- [8] 吴开华, 杜林峰. 电感耦合等离子体质谱法测定灌溉水中 7 种重金属及其定性分析[J]. 现代科学仪器, 2011, 1: 104–107.
- Wu KF, Du LF. Determination and qualitative analysis of seven heavy metals in irrigation water by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Mod Sci Instrum, 2011, 1: 104–107.
- [9] 王伟, 江小明, 杨永, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定生活饮用水中 7 种金属元素[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(3): 1053–1056.
- Wang W, Jiang XM, Yang Y, *et al.* Determination of 7 metal elements in drinking water by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2017, 8(3): 1053–1056.
- [10] Bua DG, Annuario G, Albergamo A, *et al.* Heavy metals in aromatic spices by inductively coupled plasma–mass spectrometry [J]. Food Addit Contam B, 2016, 9(3): 210–216.
- [11] 龚立科, 赵凯, 金铨, 等. 微波消解–电感耦合等离子体质谱法测定稻田土壤中的重金属[J]. 中国卫生检验杂志, 2017, 27(5): 618–621.
- Gong LK, Zhao K, Jin S, *et al.* Determination of heavy metals in paddy soil by microwave digestion – inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Chin J Health Lab Technol, 2017, 27(5): 618–621.
- [12] Dan Y, Ma X, Zhang W, *et al.* Single particle ICP – MS method development for the determination of plant uptake and accumulation of CeO₂ nanoparticles [J]. Anal Bioanal Chem, 2016, 408(19): 5157–5167.
- [13] 王雅玲, 王霞, 张晓华, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定饮用水中 15 种稀土元素[J]. 环境监测管理与技术, 2013, 25(1): 37–39.
- Wang YL, Wang X, Zhang XH, *et al.* Determination of 15 rare earth elements for drinking water by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Admin Tech Environ Monit, 2013, 25(1): 37–39.
- [14] 乔庆东, 朱亚旭, 庄景新, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定生活饮用水中的多种元素[J]. 中国卫生检验杂志, 2015, 25(7): 943–947.
- Qiao QD, Zhu YX, Zhuang JX, *et al.* Simultaneous determination of multiple elements in drinking water by ICP – MS [J]. Chin J Health Lab Technol, 2015, 25(7): 943–947.
- [15] 蒋保刚, 闫正, 宋献方, 等. 汉江上游金水河流域河水的化学特征[J]. 环境化学, 2013, 32(6): 980–986.
- Jiang BG, Yan Z, Song XF, *et al.* Water chemistry of the Jinshui river basin in the upper Han river [J]. Environ Chem, 2013, 32(6): 980–986.
- [16] Sivaji-Patra, 刘从强, 汪齐连, 等. 长江口及邻近海域水体主元素和锶同位素地球化学[J]. 地球与环境, 2009, 37(4): 333–336.
- Sivaji-Patra, Liu CQ, Wang QL, *et al.* Major Elements and Sr isotopes of the dissolved loads in the Yangtze river estuary and its adjacent areas [J]. Earth Environ, 2009, 37(4): 333–336.
- [17] GB 5084–2005 农田灌溉水质标准[S].
- GB 5084–2005 Standard for water quality of farmland irrigation [S].

(责任编辑: 王 欣)

作者简介



赵 薇, 硕士, 主要研究方向为食品安全数据采集分析。

E-mail: zhaowei78@hit.edu.cn



赵 岚, 博士, 主任医师, 主要研究方向食品安全检测。

E-mail: zhaolan75@163.com