

# 溴、碘、砷、镉等有益有害元素形态分析技术 及生态环境地球化学应用

李冰<sup>1)</sup>, 杨红霞<sup>1)</sup>, 刘巍<sup>1)</sup>, 徐思琪<sup>2)</sup>,  
余晶晶<sup>3)</sup>, 李湘<sup>4)</sup>, 张晨<sup>1)</sup>, 胡俊栋<sup>1)</sup>

1) 中国地质科学院国家地质实验测试中心, 北京 100037;

2) 深圳市福田区环境保护监测站, 广东深圳 518048;

3) 安捷伦科技(中国)有限公司, 北京 100102;

4) 西北有色地质研究院, 陕西西安 710054

**摘要:** 率先在国土资源领域培育并形成相对稳定的元素化学形态(价态、金属有机化合物等)分析及其生态环境地球化学应用研究团队, 采用高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用技术, 开展生态环境地球化学样品中痕量溴、碘、砷、镉、汞、锡、铅、铬、硒等有益有害元素的价态、金属有机化合物等形态分析方法研究, 初步建立了有益有害元素形态分析体系。建立的形态分析方法灵敏度高、检出限低, 具有创新性和实用性, 工作成果在国内外期刊发表论文 20 篇。形态分析方法在我国环境地球化学研究中得到应用并取得了良好的应用成果, 从形态分析水平上表征元素的环境地球化学及其健康效应在国内外属于探索性工作。

**关键词:** 溴; 碘; 砷; 镉; 汞; 锡; 铅; 铬; 元素形态分析

中图分类号: O65; O69 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2013.04.02

## The Speciation Analysis of Such Elements as Bromine, Iodine, Arsenic and Cadmium and Their Application in Environmental Geochemistry

LI Bing<sup>1)</sup>, YANG Hong-xia<sup>1)</sup>, LIU Wei<sup>1)</sup>, XU Si-qi<sup>2)</sup>, YU Jing-jing<sup>3)</sup>,  
LI Xiang<sup>4)</sup>, ZHANG Chen<sup>1)</sup>, HU Jun-dong<sup>1)</sup>

1) National Research Center for Geoanalysis, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Environmental Protection Monitoring Station of Futian District, Shenzhen, Guangdong 518048;

3) Agilent Technologies, Beijing 100102;

4) Northwest Geological Institute of Nonferrous Metals, Xi'an, Shaanxi 710054

**Abstract:** The research party for elements speciation analysis and environmental geochemistry application in land and resources geological field was organized. Speciation analysis methods for trace bromine, iodine, arsenic, cadmium, mercury, tin, lead, chromium, selenium and other elements in ecological environmental samples were studied and the speciation analysis system was initially established. The methods designed are innovative and practical with high sensitivity and low detection limit. 20 papers have been published in international journals. The speciation analysis method has been well applied to the study of environmental geochemistry, with good results achieved. The understanding of the characteristics of the elements in environmental geochemistry and the study of their potential health effects with a thorough speciation interpretation belong to very new and exploratory work

本文由国家自然科学基金项目(编号: 40673056; 40773048)、国土资源部公益性行业科研专项(编号: 200911043-26)、中国地质调查局地质调查项目(编号: 12120113015400)联合资助。获中国地质科学院 2012 年度十大科技进展第七名。

收稿日期: 2013-04-25; 改回日期: 2013-06-21。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 李冰, 女, 1953 年生。博士生导师, 研究员。长期从事环境地质样品中痕量超痕量元素总量及形态分析。

E-mail: libing\_12@sohu.com.

both in China and abroad in recent years. These research results can be applied to the analysis of the origin of mineral deposits and the genesis of oil and gas.

**Key words:** bromine; iodine; arsenic; cadmium; mercury; tin; lead; chromium; elements speciation analysis

元素形态分析是分析科学研究方向中一个十分重要而活跃的研究领域。元素“形态分析(Speciation)”是指某一待测元素的原子和分子状态获得证实的过程。它是联用技术为主要手段,在分子水平上获取元素存在状态信息的分析方法学,其目的是研究元素形态的生物活性或毒性;元素形态的迁移或生物有效性;元素形态的化学或物理行为。所以它不仅在生命科学、环境科学、临床以及营养学等学科中具有重要研究价值,而且对于生态环境地球化学研究同样具有重要意义。

目前,元素化学形态分析主要集中在三个不同的层次:第一,因氧化态的区别而稳定存在于体系中的元素无机阳离子、阴离子形态分析,如As(III)/As(V)、Cr(III)/Cr(VI)等;第二,元素能够通过共价键与碳联结,成为有机形态化合物,这类化合物如:各种有机砷、有机锡、有机汞、有机铅及其他有机金属和有机非金属化合物;第三,有益的或有毒的元素(金属或非金属)在特定环境下通过配合键与配体形成的稳定或不稳定络合形式的形态,如硒氨基酸。

项目组自2006年起,采用新引进的高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱(HPLC-ICP-MS)联用技术,在国家自然科学基金、科技部项目、公益性行业专项和地质调查项目的支持下,逐步建立了溴、碘、砷、镉、汞、锡、铅、铬等元素形态分析技术体系,并开展了相应的环境地球化学应用研究,取得了一些重要研究成果,主要进展和成果如下。

## 1 溴形态分析

建立了HPLC-ICPMS测定溴形态(主要有溴酸盐、溴化物和溶解性总有机溴)分析方法。选择30 mmol/L的 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 作为流动相,流速为0.8 mL/min的条件下, $\text{BrO}_3^-$ 与 $\text{Br}^-$ 的保留时间分别为2.65 min和3.56 min。溴形态色谱分离图如图1所示。在此条件下 $\text{BrO}_3^-$ 、 $\text{Br}^-$ 的方法检出限(以溴计)分别为0.052  $\mu\text{g/L}$ 和0.048  $\mu\text{g/L}$ 。

### 1.1 商品矿泉水溴酸盐(潜在致癌物)含量调查

通过对市售商品矿泉水中溴酸盐含量的调查,对政府部门为矿泉水溴酸盐限量立法起到了促进和保证作用。项目组随机测定了北京超市购买的25种(含8种国外进口)瓶装矿泉水。其中有9种(1种国

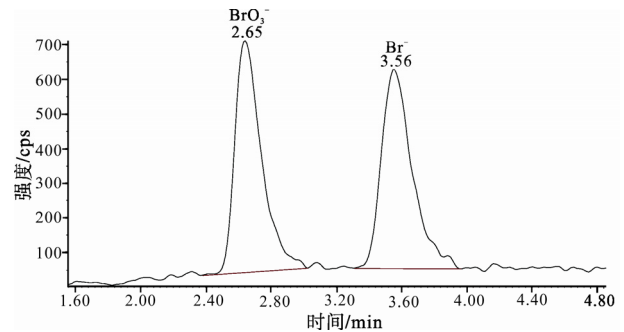


图1  $\text{BrO}_3^-$ 及 $\text{Br}^-$ 混合标准溶液色谱分离图

Fig. 1 Chromatogram of  $\text{BrO}_3^-$  and  $\text{Br}^-$  mixing standard solution by HPLC-ICP-MS

外进口)矿泉水中溴酸盐含量超过国家生活饮用水卫生标准允许的最高溴酸盐浓度,其中一种矿泉水中溴酸盐含量是国家允许最高含量的6倍多。如长期饮用,存在潜在的致癌危险。中国地质科学院国家地质实验测试中心将这一调查状况和问题逐级向国家政府部门书面报告,引起了相关部门的重视,并派质量监督部门一组人员来中心专访和意见反馈。不久,有关部门出台了矿泉水溴酸盐限定法规。

### 1.2 溴工业污染调查

将建立的溴形态分析方法应用于科技部国际合作项目(编号:2006DFA21280)中辽宁西部及沈阳地区河水及地下水中溴化物、溴酸盐的分布及其污染特征调查(杨永亮等,2009)。结果表明大凌河和小凌河河水未受到溴的污染。细河浅层地下水中溴酸盐被检出的浓度存在超标情况。浅层地下水中高溴离子浓度,和具有强烈毒理效应的溴酸盐的存在,对该地区生态系统和人类健康具有潜在负面影响。

### 1.3 面粉样品中溴形态分析

建立了面粉样品中溴形态分析方法(刘崴等,2009),并应用于市售面粉样品中。采用振荡水提1 h对10种市售不同品牌不同种类面粉样品中的溴形态进行检测,样品测定前经0.22  $\mu\text{m}$ 滤膜过滤后上机测试。所检测面粉样品中溴主要以 $\text{Br}^-$ 的形态存在,且均没有发现 $\text{BrO}_3^-$ 。

## 2 碘形态分析

建立了痕量碘及形态(主要有碘酸盐、碘化物和溶解性总有机碘)分析方法,以0.03  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 为流动相, $\text{IO}_3^-$ 与 $\text{I}^-$ 的保留时间分别为1.68 min和8.7 min,色谱分离图如图2所示。通过

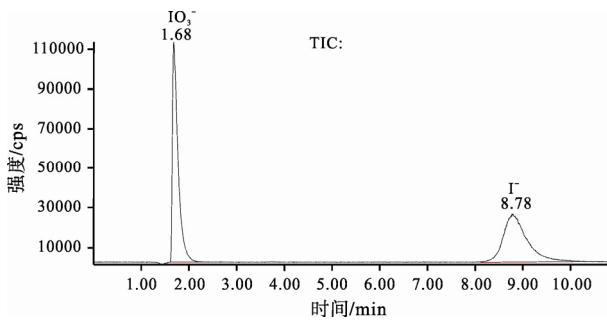


图 2 IO<sub>3</sub><sup>-</sup> 及 I<sup>-</sup> 标准溶液色谱图

(c(IO<sub>3</sub><sup>-</sup>)=c(I<sup>-</sup>)=50 nmol/L, 0.01% KOH 介质)

Fig. 2 Chromatogram of IO<sub>3</sub><sup>-</sup>, I<sup>-</sup> mixing standard by HPLC-ICP-MS(c(IO<sub>3</sub><sup>-</sup>)=c(I<sup>-</sup>)=50 nmol/L, 0.01% KOH media)

改变标准溶液的储存介质解决了 IO<sub>3</sub><sup>-</sup> 与 I<sup>-</sup> 形态不稳定的问题(Liu et al., 2007)。首次报道采用乙醇增加碘灵敏度, 使碘的检出限达到目前国内外先进水平 0.005 μg/g(刘崴等, 2010), 该方法已用于高碘地区的调查和评价, 以及北极考察样品有关碘来源及环境意义的研究。

### 2.1 高碘地区地下水碘形态分析

本方法用于山西汾阳高碘地区调查与评价研究(Liu et al., 2011; Yang et al., 2007; 刘崴等, 2008), 分析了 1000 多件样品, 为分析碘的含量分布、赋存状态、迁移转化条件和规律以及对人体健康的影响提供了大量有用的数据, 从而为改水和供水安全提供了可靠的科学依据。

### 2.2 大气气溶胶中碘、溴的形态分布、来源及其环境意义研究

与中国科技大学合作, 对中国第二、三次北极考察沿线、中国近海海域及合肥地区气溶胶样品中溴碘形态进行分析。结合气团轨迹反演、气象数据、地震数据、叶绿素浓度数据、第 22 次南极考察中获取的气溶胶碘形态数据以及文献中其它地区的溴、碘形态数据, 对样品中溴、碘及其形态的分布特征和来源及其环境意义进行了讨论。通过大范围、长时间的采样和分析, 获得一大批第一手的大气气溶胶中溴、碘形态的数据, 其中北极等地区数据均是首次报道(Xu et al., 2010; 徐思琦等, 2010)。为碘溴与全球变化的相关性研究提供了重要的技术支持。

## 3 砷形态分析

建立了 HPLC-ICP-MS 测定水体、尿液、生物等样品中砷形态 As(III)、As(V)、一甲基砷(MMA)、二甲基砷(DMA)、甜菜碱砷(AsB)分析方法, 五种砷形态在 14 min 内即可完全分离(Hamilton PRP-X100 阴离子交换柱), 方法检出限: 0.1~0.14 μg/L(图 3)。

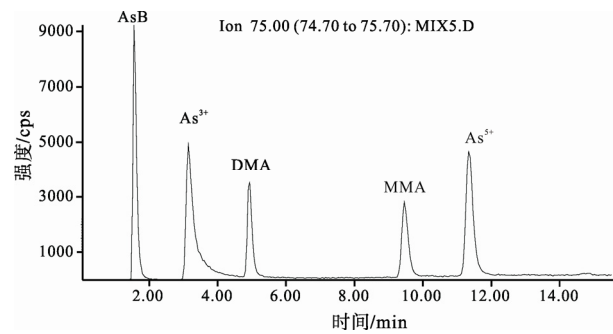


图 3 五种砷形态的色谱分离图

Fig. 3 HPLC-ICP-MS chromatogram of five As species

### 3.1 浒苔砷形态分析

本项目和国家海洋局第三研究所合作, 对青岛周边海域中 9 种浒苔样品中砷的总量及其化学形态进行了分析测定。总量分析结果显示, 青岛周边海域浒苔中的砷总量在 3.0~9.7 mg/kg 之间, 超过了我国 2005 年颁布的 GB 2762—2005《食品中污染物限量》中规定了藻类(干重计)中的无机砷限量指标; 形态分析结果显示, 青岛浒苔样品中砷的主要存在形态为 As(V)和一种疑为砷糖类的物质, 另外还有少量的 DMA 和 As(III), 为浒苔作为食品及药物使用提供参考。

### 3.2 地下水等砷污染调查研究工作

为国家标准物质研究中心研制的尿样标准物质以及中国地质科学院国家地质实验测试中心地质调查项目研制的地下水砷形态标准物质定值提供了准确结果。同时为中国地质科学院岩溶地质研究所有关研究项目进行了沉积物中砷形态分析, 砷形态测试数据为该研究项目提供了有用信息。

## 4 镉形态分析

建立了 SEC-HPLC-ICPMS 测定 Cd 形态分析方法, 在叶片和根部均检测到植物螯合肽(PC)<sub>3</sub>-Cd、植物螯合肽(PC)<sub>2</sub>-Cd、谷胱甘肽(GSH)-Cd, 及半胱氨酸(Cys)-Cd 四种形态(图 4)。Cd 形态极不稳定, 样品处理采取液氮保护并-70 保存, 样品分析全流程用氮吹防氧化措施(杨红霞等, 2010)。研究了胁迫浓度和胁迫时间对镉形态的影响及 Cd 形态在植物体内的分布规律(杨红霞等, 2013a)。建立了 SEC-HPLC-ICP-MS 同时测定印度芥菜中 Cd、Cu、Zn 形态分析的方法, 研究结论为一种植物同时修复 Cd、Cu、Zn 复合污染提供了可能(杨红霞等, 2013a)。结合植物中细胞镉分布规律及细胞超微结构, 探讨了植物螯合肽和区隔化在耐镉机制中的作用(杨红霞等, 2013b)。项目成果与镉污染土壤修复现场相结

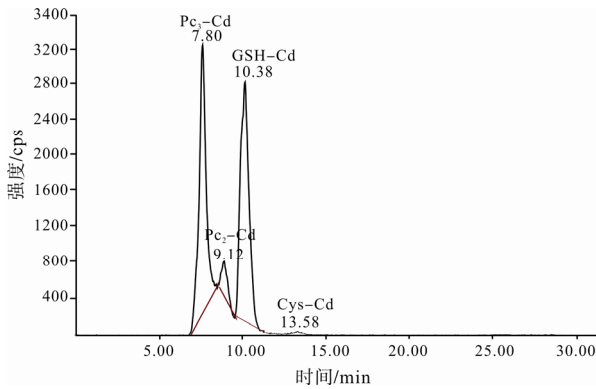


图4 Cd形态 SEC-HPLC-ICPMS 色谱图  
Fig. 4 SEC-ICP-MS chromatogram of Cd species

合,为植物修复镉污染土壤的可行性提供技术支持,同时为寻找镉超积累植物提供判断依据。

## 5 汞形态分析

建立了碱消解 HPLC-ICP-MS 测定土壤和生物样品中汞形态(包括无机汞、甲基汞(MeHg)、乙基汞(EtHg))分析方法(杨红霞等,2008)。改进了常规水产品中甲基汞的碱消解提取方法,缩短了处理时间,建立了水浴浸提-高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱联用技术快速测定水产品中甲基汞的方法(余晶晶等,2010)。分析了市售的6种水产品,测得其中的甲基汞含量均低于 GB 2762—2005《食品中污染物限量》标准,所建立的方法能够满足生物样品中甲基汞形态的分析要求。图5为甲基汞和乙基汞的标准色谱分离图。

## 6 锡形态分析

建立了 HPLC-ICPMS 同时测定水溶液和沉积物中四种有机锡形态(二丁基氯化锡(DBT)、三丁基氯化锡(TBT)、二苯基氯化锡(DPhT)、三苯基氯化锡(TPhT))分析方法,色谱分离图如图6所示。检出限分别为 0.1  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 0.1  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 0.09  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 0.1  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

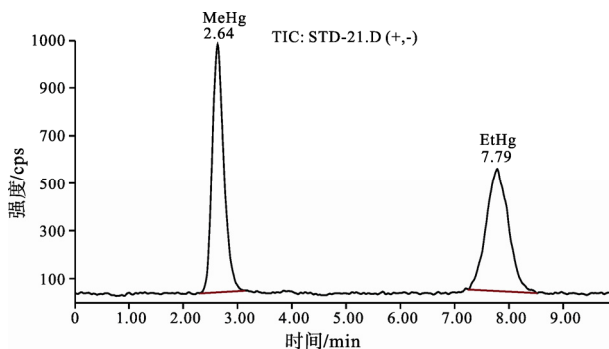


图5 甲基汞和乙基汞混合标准色谱图  
Fig. 5 HPLC-ICP-MS chromatogram of MeHg and EtHg standard solutions

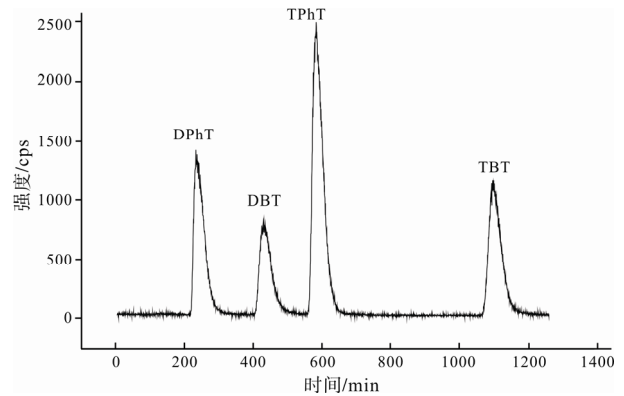


图6 四种有机锡的 HPLC-ICP-MS 分离色谱图  
Fig. 6 HPLC-ICP-MS chromatographic spectra of four organic tin species

通过改变流动相组分比例,使四种有机锡达到基线分离(李湘等,2011a)。

### 6.1 食品安全评价

环境中极低含量的有机锡即能对生物产生毒性作用,对市场上随机购买的带鱼、海虾、扇贝三种海产品进行了分析。三种海产品均检测到了一种未知的锡形态,在扇贝和带鱼中均检测到了少量的 TBT 和 TPhT。

### 6.2 沉积物样品中锡形态分析

从青岛海域随机采集的沉积物,未检测到有机锡。从大连海域采集了6个沉积物样品,其中4个均检测到一定量的 DBT 和 TBT 形态,其余两个未检出有机锡形态。

## 7 铅形态分析

铅等重金属元素矿产资源的开采造成了环境问题的日益突出(储彬彬等,2012)。本项目组采用振荡提取方式,建立了 HPLC-ICP-MS 测定土壤中有机铅形态的分析方法。从图7中可看出,在梯度洗脱条件下,20 min 内可分离出三甲基氯化铅(TML)、三乙基氯化铅(TEL)、三苯基氯化铅(TPhL)三种有机铅形态。采用微型同心雾化器,提高了测定灵敏度。

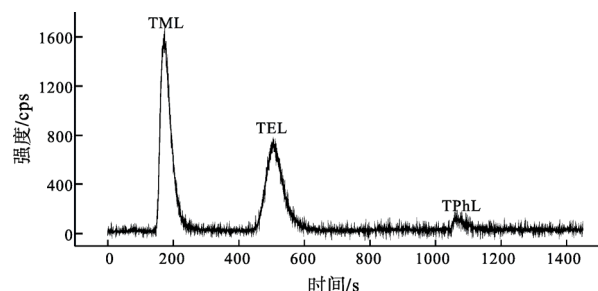


图7 有机铅混合标准溶液色谱图  
Fig. 7 HPLC chromatogram of Pb mixed standard solution



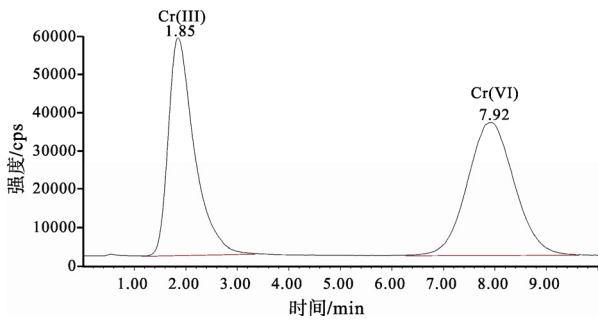


图 8 Cr(III)和 Cr(VI)混合标准溶液色谱图

Fig. 8 HPLC chromatogram of mixed standard solution with Cr(III) and Cr(VI)

检出限分别为 0.14  $\mu\text{g/L}$ 、0.33  $\mu\text{g/L}$  和 1.45  $\mu\text{g/L}$ 。采用的建立的方法测定了实际土壤样品中的有机铅形态,为分析该地区土壤污染来源、铅污染环境行为等情况,评估该地区土壤质量和污染状况提供了技术支持(李湘等, 2011b)。

## 8 铬形态分析

建立了 HPLC-ICP-MS 测定水体、土壤、水泥样品中铬形态(Cr(III)、Cr(VI))的分析方法,两种铬形态在 10 min 内可完全分离(Agilent Cr speciation column(G3268-80001)), Cr(III)、Cr(VI)方法检出限分别为 0.03  $\text{ng/mL}$  和 0.02  $\text{ng/mL}$ , 色谱分离图如图 8 所示。

安全评价: Cr(VI)具有强烈的毒性,并被认为是具有致癌性,对环境和人体健康有着极大的危害作用。欧盟规定水泥中 Cr(VI)含量不得高于 2  $\text{mg/kg}$ ,从市场随机采集五种水泥样品进行分析,五种样品中均检测到浓度很高的 Cr(VI)(50~100  $\text{mg/kg}$ )。

## 9 总结

本项目组建立了生态环境地球化学样品中痕量溴、碘、砷、镉、汞、锡、铅等有益有害元素形态分析方法体系。建立的方法灵敏度高、检出限低,具有创新性和实用性,在生态地球化学调查与评价、食品安全检验及地方病调查中得到很好的应用,为生态环境中元素的迁移转化、生物可利用性、新陈代谢作用研究提供了重要的新技术支持。从形态分析水平上表征溴、碘等元素的环境地球化学及其健康效应在国内外属于新的探索性工作,对环境地球化学行为研究具有重要意义。

## 参考文献:

储彬彬, 罗立强, 王晓芳, 刘颖, 伯英. 2012. 南京栖霞山铅锌矿区铅同位素示踪[J]. 地球学报, 33(2): 209-215.

- 李湘, 余晶晶, 李冰, 胡俊栋, 杨红霞, 刘崴, 胡世斌. 2011a. 高效液相色谱-电感耦合等离子质谱法分析海洋沉积物中有机的形态[J]. 分析化学, 39(9): 1400-1405.
- 李湘, 余晶晶, 李冰, 胡世斌, 曹心德, 戴家银. 2011b. 电感耦合等离子体质谱法测定染铅猪仔的血铅、尿铅含量[J]. 分析实验室, 30(8): 88-91.
- 刘崴, 李冰, 杨红霞, 徐思琦. 2009. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法测定面粉中溴酸盐与溴化物[J]. 分析化学, 37(9): 1337-1340.
- 刘崴, 杨红霞, 李冰, 徐思琦. 2010. 乙醇增强-电感耦合等离子体质谱法测定植物样品中的痕量碘[J]. 分析实验室, 29(6): 31-33.
- 刘崴, 杨红霞, 李冰. 2008. 碘分析方法研究进展[J]. 岩矿测试, 27(2): 127-136.
- 徐思琦, 谢周清, 刘崴, 杨红霞, 李冰. 2010. 大气气溶胶中溴、碘总量及其形态的提取和测定[J]. 分析化学, 38(2): 219-224.
- 杨红霞, 刘崴, 李冰. 2008. 碱消解-高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法测定生物样品中的甲基汞和乙基汞[J]. 岩矿测试, 27(6): 405-408.
- 杨红霞, 刘崴, 李冰, 魏巍, 张惠娟, 陈登云. 2010. 体积排阻高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法同时测定印度芥菜(Brassica Juncea)中镉、铜、锌形态[J]. 岩矿测试, 29(1): 9-13.
- 杨红霞, 刘崴, 李冰, 魏巍, 张惠娟. 2013a. 胁迫浓度和胁迫时间对印度芥菜中镉形态分布的影响[J]. 岩矿测试, 32(2): 306-310.
- 杨红霞, 张惠娟, 胡俊栋, 刘崴. 2013b. 细胞中镉含量分布特征[J]. 生态学杂志, 待刊.
- 杨永亮, 刘崴, 刘晓端, 李冰, 王晓春, 徐清, 罗松光. 2009. 辽宁省西部及沈阳地区河水及地下水中溴的分布及污染特征[J]. 环境化学, 28(6): 928-932.
- 余晶晶, 杨红霞, 刘崴, 李冰, 王小如. 2010. 水浴浸提-高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法快速测定水产品中的甲基汞[J]. 分析化学, 38(2): 299.
- 中华人民共和国卫生部. 2005. GB 2762—2005《食品中污染物限量》[S]. 北京: 中国标准出版社.

## References:

- CHU Bin-bin, LUO Li-qiang, WANG Xiao-fang, LIU Ying, BO Ying. 2012. Lead Isotopes as Tracers in the Qixiashang Lead-Zinc Mining Area, Nanjing[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(2): 209-215(in Chinese with English abstract).
- LI Xiang, YU Jing-jing, LI Bing, HU Jun-dong, YANG Hong-xia, LIU Wei, HU Shi-bin. 2011a. Simultaneous Determination of Organotin Compounds in Marine Sediments by High Performance Liquid Chromatography-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 39(9): 1400-1405(in Chinese with English abstract).
- LI Xiang, YU Jing-jing, LI Bing, HU Shi-bin, CAO Xin-de, DAI Jia-yin. 2011b. Determination of Pb element in blood and

- urine of lead-exposed pigs by inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 30(8): 88-91(in Chinese with English abstract).
- LIU Wei, LI Bing, YANG Hong-xia, XU Si-qi. 2009. Specific Determination of Bromate and Bromide in Flour by High Performance Liquid Chromatography-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 37(9): 1337-1340(in Chinese with English abstract).
- LIU Wei, YANG Hong-xia, LI Bing, XU Si-qi. 2010. Determination of iodine concentration in plant samples by inductively coupled plasma mass spectrometry with ethanol as a signal enhancer[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 29(6): 31-33(in Chinese with English abstract).
- LIU Wei, YANG Hong-xia, LI Bing, XU Si-qi. 2011. Determination of Bromine and Iodine Speciation in Drinking Water Using High Performance Liquid Chromatography-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (HPLC-ICP-MS)[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 11(3): 69-74.
- LIU Wei, YANG Hong-xia, LI Bing, CHEN Deng-yun, ZHANG Hui-juan. 2007. Speciation Stabilities of Iodine in underground Water by High Performance Liquid Chromatography-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry[J]. Chinese Journal of Analysis Chemistry, 35(4): 571-574.
- LIU Wei, YANG Hong-xia, LI Bing. 2008. Recent Development of Methods for Iodine Analysis[J]. Rock and Mineral Analysis, 27(2): 127-136(in Chinese with English abstract).
- Ministry of Health, P. R. China. 2005. Maximum levels of contaminants in foods[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- XU Si-qi, XIE Zhou-qing, LI Bing, LIU Wei, SUN Li-guang, KANG Hui, YANG Hong-xia, ZHANG Peng-fei. 2010. Iodine speciation in marine aerosols along a 15000-km round-trip cruise path from Shanghai, China, to the Arctic Ocean[J]. Environmental Chemistry, 7(5): 406-412.
- XU Si-qi, XIE Zhou-qing, LIU Wei, YANG Hong-xia, LI Bing. 2010. Extraction and Determination of Total Bromine, Iodine, and Their Species in Atmospheric Aerosol[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 38(2): 219-224(in Chinese with English abstract).
- YANG Hong-xia, LIU Wei, LI Bing. 2008. Determination of methyl mercury and Ethylmercury in Biological Samples by Alkaline Digestion-High Performance Liquid Chromatography-Inductively Coupled Plasmas Mass Spectrometry[J]. Rock and Mineral Analysis, 27(6): 405-408(in Chinese with English abstract).
- YANG Hong-xia, LIU Wei, LI Bing, WEI Wei, ZHANG Hui-juan, CHEN Deng-yun. 2010. Speciation Analysis of Cadmium, Copper and Zinc in Indian Mustard(*Brassica Juncea*) by Size Exclusion-High Performance Liquid Chromatography-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry[J]. Rock and Mineral Analysis, 29(1): 9-13(in Chinese with English abstract).
- YANG Hong-xia, LIU Wei, LI Bing, WEI Wei, ZHANG Hui-juan. 2013a. Effect of Exposure Levels and Exposure Time on Distribution of Cadmium Species in Indian Mustard (*Brassica Juncea*)[J]. Rock and Mineral Analysis, 32(2): 306-310(in Chinese with English abstract).
- YANG Hong-xia, LIU Wei, LI Bing, ZHANG Hui-juan, LIU Xiao-duan, CHEN Deng-yun. 2007. Speciation Analysis for Iodine in Groundwater Using High Performance Liquid Chromatography-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (HPLC-ICP-MS)[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 31(4): 345-351.
- YANG Hong-xia, ZHONG Hui-juan, LIU Wei, LI Bing. 2013b. Subcellular distribution of cadmium in Brassica Juncea by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry and Transmission Electron Microscopy[J]. Chinese Journal of Ecology, in Press(in Chinese with English abstract).
- YANG Yong-liang, LIU Wei, LIU Xiao-duan, LI Bing, WANG Xiao-chun. 2009. Distribution and contramination characteristics of bromine in surface water and ground water from the western Liaoning and Shenyang area[J]. Environmental Chemistry, 28(6): 928-932(in Chinese with English abstract).
- YU Jing-jing, YANG Hong-xia, LIU Wei, LI Bing, WANG Xiao-ru. 2010. Determination of methylmercury in aquatic products by High Performance Liquid Chromatography-Inductively Coupled plasma mass Spectrometry with Water-Bath Heating[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 38(2): 299(in Chinese with English abstract).