

## 快速消解测定土壤中金属元素

朱 锋<sup>1,2</sup>, 胡星云<sup>\*2</sup>, 郭照冰<sup>1</sup>, 梅凤仙<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学, 南京 210044; 2. 中国科学院生态环境研究中心工业废水处理与资源化北京市重点实验室, 饮用水科学与技术重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 建立了一种针对土壤样品中重金属检测的快速消解方法。该消解方法适用于土壤样品中 As, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba, Cr, Sb, Cu, Ga, Li, Pb, Al, Fe, Mg, Ti 共 18 种重金属元素的检测。前处理后样品用电感耦合等离子体发射光谱法 (ICP-OES) 和电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 进行检测。通过 GBW07408 标准土样进行方法认证, 确定了最佳消解条件: 样品量为 0.1000 g; 添加 4 mL HNO<sub>3</sub> - 2 mL HCl 或 1.5 mL HNO<sub>3</sub> - 4 mL HCl; 温度: 120 °C; 时间: 3 h。最佳条件下方法的相对标准偏差为 0.19% ~ 1.4%, 加标回收率为 95.4% ~ 100.6%。该消解方法可以取得和微波消解一样准确的结果。

**关键词:** 快速消解; 土壤; 重金属; 酸消解体系

中图分类号: X131.3; O657.63 文献标识码: A 文章编号: 1000-0720(2019)08-0906-06

### Determination of heavy metals in soil by rapid digestion

ZHU Feng<sup>1,2</sup>, HU Xing-yun<sup>\*2</sup>, GUO Zhao-bing<sup>1</sup> and MEI Feng-xian<sup>1</sup> (1. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

**Abstract:** A rapid digestion method for the detection of heavy metals in soil samples was established. The method was suitable for the detection of 18 metal elements such as As, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba, Cr, Sb, Cu, Ga, Li, Pb, Al, Fe, Mg, Ti. The contents of metal elements in pretreated samples were tested by inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES) and inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS). The optimal digestion conditions were obtained using the national standard soil samples of GBW07408: 0.1000 g soil, 4 mL HNO<sub>3</sub> and 2 mL HCl or 1.5 mL HNO<sub>3</sub> and 4 mL HCl, 120 °C for 3 hours. The relative standard deviations (RSDs) of the method under the optimal conditions were 0.19% - 1.4%, and the recoveries of standard addition were 95.4% - 100.6%. The digestion method can obtain the same accurate results as those of microwave digestion.

**Keywords:** Rapid digestion; Soil; Heavy metal; Acid digestion system

常用的土壤样品前处理技术包括微波消解, 电热板消解, 全自动石墨消解, 全自动消解仪消解等。微波消解法耗酸量少, 拥有极高的溶解效率, 准确度和精密度较高, 但需要二次赶酸, 在转移赶酸的过程中会造成挥发性元素损失严重<sup>[1-6]</sup>。电热板消解仪器价格低廉, 操作简单, 但存在消解时间漫长, 受热不均匀等弊端, 且整个过程需要人工操作,

仪器呈开放体系易造成酸污染<sup>[7-9]</sup>。全自动石墨消解耗时短, 控温性好, 能够同时进行大批量消解, 但用酸量多, 仪器投入昂贵<sup>[10-11]</sup>。全自动消解过程自动化, 提高了实验效率但对于部分土壤样品需要增加反王水和高氯酸, 会增加样品受污染的风险<sup>[12]</sup>。

针对以上消解过程存在的问题, 开发了一种

收稿日期: 2018-10-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(21607166)资助

\* 通信作者, E-mail: xyhu@rcees.ac.cn

简单、实用、经济的土壤消解方法。使用快速消解仪进行前处理,该仪器价格低廉,占用空间小,操作简单,受热均匀,全程能够实现自动化处理,封闭体系可减少挥发性元素的损失和保障操作人员的实验安全。在消解过程中建立的  $\text{HNO}_3$ - $\text{HCl}$  酸体系,因没有  $\text{HF}$  的加入,可使用玻璃消解管,减少聚四氟乙烯管的投入。在玻璃消解管中同时进行消解和赶酸,可减少转移过程对测定元素的干扰损失。

采用 ICP-OES 与 ICP-MS 结合测定 As, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba, Cr, Sb, Cu, Ga, Li, Pb, Al, Fe, Mg, Ti, 具有检出限低、稳定性好、干扰效应小、效率高等特点<sup>[13-15]</sup>。

本文通过调试两种酸的比例与消解 GBW07408 标准土样进行方法认证,得到最佳酸体系,为土壤中重金属的快速消解提供支持。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器及试剂

DRB200 快速消解仪(美国哈希公司), iCAP Q 电感耦合等离子体质谱仪(美国赛默飞公司), ICPE-9800 电感耦合等离子体发射光谱仪(日本岛津公司), Mars6 微波消解仪(美国 CEM 公司)。

土壤标准物质(GBW07408, 国家标准物质中心)。As, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba, Pb, Cr, Sb, Cu, Ga, Li, Al, Fe, Mg, Ti 多元素标准溶液(100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ , GSB 04-1767-2004, 国家有色金属及电子材料分析测试中心)。 $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$  (优级纯, 中国国药集团)。实验用水为超纯水。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 样品消解

##### (1) 不挥发性金属元素

对标准土壤 GBW07408 进行分析测定,根据酸消解体系的不同,将其分为 4 组,分别为 ① 3.000 mL  $\text{HNO}_3$  + 1.500 mL  $\text{HCl}$ ; ② 3.000 mL  $\text{HNO}_3$  + 2.000 mL  $\text{HCl}$ ; ③ 4.000 mL  $\text{HNO}_3$  + 2.000 mL  $\text{HCl}$ ; ④ 5.000 mL  $\text{HNO}_3$  + 2.000 mL  $\text{HCl}$ 。对土壤中 Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ba, Cr, Cu, Ga, Li, Pb, Al, Fe, Mg, Ti 进行消解测定。

称取 0.1000 g 土壤样品于 10 mL 消解管中,加入  $\text{HNO}_3$ - $\text{HCl}$  置于快速消解仪,常压 120  $^\circ\text{C}$  下消解 3 h,待管内温度降到室温后,打开消解仪和消解管盖。设置温度为 120  $^\circ\text{C}$  在快速消解仪上进行赶酸,待液体成粘稠状时,取下稍冷。过滤消解液,利

用 1% (V/V)  $\text{HNO}_3$  少量多次洗涤消解管,定容至 10 mL,混匀,静置待测。

##### (2) 挥发性金属元素

对标准土壤 GBW07408 进行分析测定,根据酸消解体系的不同,综合现有标准以及文献资料将消解体系分为 4 组,分别为 ⑤ 1.000 mL  $\text{HNO}_3$  + 3.000 mL  $\text{HCl}$ ; ⑥ 2.000 mL  $\text{HNO}_3$  + 3.000 mL  $\text{HCl}$ ; ⑦ 1.500 mL  $\text{HNO}_3$  + 4.000 mL  $\text{HCl}$ ; ⑧ 2.000 mL  $\text{HNO}_3$  + 4.000 mL  $\text{HCl}$ ,对土壤中 As, Sb 进行消解测定。

称取 0.1000 g 土壤样品于 10 mL 消解管中,加入  $\text{HNO}_3$ - $\text{HCl}$  置于快速消解仪,常压 120  $^\circ\text{C}$  下消解 3 h,待管内温度降到室温后,打开快速消解管盖。过滤消解液,利用超纯水少量多次洗涤消解管,定容至 10 mL,混匀,静置待测。因 As, Sb 较易挥发,故不进行赶酸处理。

上述实验均做 5 组平行样。按照相同的程序,平行制作两份空白样。在快速消解仪上温度控制不应高于 140  $^\circ\text{C}$ ,避免  $\text{HNO}_3$  挥发严重。

1.2.2 标准曲线 (1) 准确移取(100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) 混合标准溶液至 100 mL 容量瓶,逐级稀释,利用 1% (V/V)  $\text{HNO}_3$  定容,配置成 0, 1, 10, 20, 50, 100, 200  $\mu\text{g}/\text{L}$  系列标准溶液。

(2) 准确移取(100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) 混合标准溶液至 100 mL 容量瓶,逐级稀释,利用 1% (V/V)  $\text{HNO}_3$  定容,配置成 0, 1, 5, 10, 20, 50, 100  $\mu\text{g}/\text{L}$  系列标准溶液。

1.2.3 测定方法 (1) Al, Ba, Fe, Mg, Ti, Mn 用 ICP-OES 测定,测试条件见表 1。

(2) As, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Cr, Sb, Cu, Ga, Li, Pb 用 ICP-MS 测定。

表 1 电感耦合等离子体发射光谱仪的仪器条件

Table 1 The instrumental conditions of ICP-OES

Element	Wavelength/nm	Power/W	Auxiliary gas flow / (L/min)
Al	167.081	0.5	0.7
Ba	233.527/455.403	0.5	0.7
Fe	238.204	0.5	0.7
Ti	336.121	0.5	0.7
Mn	257.61	0.5	0.7
Mg	383.826	0.5	0.7

## 2 结果与讨论

### 2.1 方法精密度

在消解过程中因混合酸的使用引入了大量

的 N, Cl, H, O 等元素, 与相关元素形成大量的多原子干扰。因此设置对应酸体系的空白样品, 对空白样品进行消解处理, 分别采用标准模式、碰撞模式对空白溶液进行测定, 采用 Pb 和 Ni 作为内标元素。

由表 2 和表 3 线性方程和相关系数结果可知, 标准土壤各元素的线性相关系数均  $\geq 0.999$ , 满足测试要求。

表 2 ICP-OES 测试元素的线性方程和相关系数

Table 2 The linear equations and correlation coefficients for ICP-OES

Element	Equation	Coefficient
Al	$y = 1.6832x + 5.7986$	0.9992
Ba	$y = 511.9x + 775.32$	0.9998
Fe	$y = 124.12x + 190.84$	0.9996
Mg	$y = 17.993x + 290.11$	0.9999
Mn	$y = 950.91x + 566.29$	0.9996
Ti	$y = 88.141x + 187.33$	0.9997

表 3 ICP-MS 测试元素的线性方程和相关系数

Table 3 The linear equations and correlation coefficients for ICP-MS

Element	Equation	Coefficient
As	$y = 9.187x + 17.055$	0.9995
Cr	$y = 62.308x + 67.823$	0.9993
Cd	$y = 36.885x + 24.148$	1.0000
Co	$y = 195.03x + 22.154$	1.0000
Cu	$y = 118.47x + 41398$	0.9993
Ga	$y = 22.029x + 6.8357$	0.9998
Li	$y = 9.2181x + 33.491$	0.9999
Ni	$y = 57.754x + 3.6149$	0.9996
Sb	$y = 59.311x + 52.291$	1.0000
Zn	$y = 16.223x + 1280.6$	0.9993
Pb	$y = 684.76x + 339.93$	0.9993

## 2.2 样品分析

将快速消解数据与国标微波消解<sup>[16]</sup>数据进行比较, 结果见表 4 和表 5。

表 4 不挥发性元素测定结果 (n = 5)

Table 4 Results of non-volatile element (n = 5)

Method	Element	Average/(mg/kg)	Standard/(mg/kg)	Recovery/%	RSD/%
①	Cr	62.04 ± 1	68 ± 6	91.2	0.21
②	Cr	66.00 ± 5	68 ± 6	97.1	0.39
③	Cr	66.85 ± 5	68 ± 6	98.3	0.38
④	Cr	69.45 ± 3	68 ± 6	102.1	0.19
Microwave	Cr	65.28 ± 1	68 ± 6	96.0	0.34
①	Cd	0.114 ± 0.01	0.13 ± 0.02	87.7	1.0
②	Cd	0.118 ± 0.01	0.13 ± 0.02	90.8	1.1
③	Cd	0.124 ± 0.01	0.13 ± 0.02	95.4	0.98
④	Cd	0.127 ± 0.01	0.13 ± 0.02	97.7	0.99
Microwave	Cd	0.163 ± 0.01	0.13 ± 0.02	125.1	1.7
①	Co	12.26 ± 0.5	12.7 ± 1.1	96.5	0.53
②	Co	12.27 ± 0.6	12.7 ± 1.1	96.6	0.39
③	Co	12.48 ± 0.8	12.7 ± 1.1	98.3	0.44
④	Co	12.57 ± 0.5	12.7 ± 1.1	99.0	0.85
Microwave	Co	12.03 ± 0.6	12.7 ± 1.1	94.7	0.65
①	Cu	21.52 ± 1.0	24.3 ± 1.2	88.6	1.4
②	Cu	22.77 ± 1.0	24.3 ± 1.2	93.7	1.5
③	Cu	23.24 ± 0.7	24.3 ± 1.2	95.6	1.4
④	Cu	24.10 ± 1.0	24.3 ± 1.2	99.2	2.0
Microwave	Cu	25.24 ± 0.6	24.3 ± 1.2	104.0	1.0
①	Ga	14.44 ± 0.8	14.8 ± 1.1	97.6	0.99
②	Ga	14.54 ± 0.5	14.8 ± 1.1	98.2	0.93
③	Ga	14.83 ± 0.5	14.8 ± 1.1	100.2	0.56
④	Ga	15.76 ± 0.5	14.8 ± 1.1	106.5	0.86
Microwave	Ga	13.88 ± 0.7	14.8 ± 1.1	93.8	0.45
①	Li	33.56 ± 1.3	35 ± 2	95.9	0.45

续表 4( Continued Table 4)

Method	Element	Average/( mg/kg)	Standard/( mg/kg)	Recovery/%	RSD/%
②	Li	34.17 ± 1.2	35 ± 2	97.6	0.43
③	Li	34.58 ± 0.9	35 ± 2	98.8	0.29
④	Li	34.59 ± 1.5	35 ± 2	98.8	0.29
Microwave	Li	33.27 ± 1.7	35 ± 2	95.1	0.14
①	Ni	29.10 ± 1.5	31.5 ± 1.8	92.4	1.1
②	Ni	30.31 ± 1.3	31.5 ± 1.8	96.2	1.2
③	Ni	30.81 ± 1.2	31.5 ± 1.8	97.8	0.98
④	Ni	30.89 ± 1.6	31.5 ± 1.8	98.1	0.79
Microwave	Ni	30.56 ± 1.5	31.5 ± 1.8	97.0	0.78
①	Zn	62.57 ± 4.0	68 ± 4	92.0	2.0
②	Zn	65.32 ± 3.0	68 ± 4	96.0	1.7
③	Zn	66.81 ± 3.6	68 ± 4	98.3	1.2
④	Zn	66.89 ± 3.1	68 ± 4	98.4	1.5
Microwave	Zn	69.99 ± 3.6	68 ± 4	103.0	1.0
①	Pb	19.40 ± 1.4	21 ± 2	92.4	1.4
②	Pb	20.08 ± 1.2	21 ± 2	95.6	1.5
③	Pb	20.76 ± 1.7	21 ± 2	98.9	1.0
④	Pb	20.82 ± 1.0	21 ± 2	99.1	1.3
Microwave	Pb	21.03 ± 1.4	21 ± 2	100.1	0.86
①	Al	6.08 × 10 <sup>4</sup> ± 703	6.3 × 10 <sup>4</sup> ± 792	96.5	0.84
②	Al	6.11 × 10 <sup>4</sup> ± 673	6.3 × 10 <sup>4</sup> ± 792	97.0	0.65
③	Al	6.21 × 10 <sup>4</sup> ± 599	6.3 × 10 <sup>4</sup> ± 792	98.6	0.34
④	Al	6.21 × 10 <sup>4</sup> ± 637	6.3 × 10 <sup>4</sup> ± 792	98.6	0.42
Microwave	Al	6.04 × 10 <sup>4</sup> ± 711	6.3 × 10 <sup>4</sup> ± 792	95.9	0.45
①	Ba	453.1 ± 20	480 ± 23	94.4	1.4
②	Ba	465.3 ± 19	480 ± 23	96.9	0.94
③	Ba	470.9 ± 18	480 ± 23	98.1	1.0
④	Ba	475.0 ± 16	480 ± 23	99.0	1.0
Microwave	Ba	453.2 ± 20	480 ± 23	94.4	1.3
①	Fe	3.131 × 10 <sup>4</sup> ± 305	3.316 × 10 <sup>4</sup> ± 370	94.4	0.78
②	Fe	3.197 × 10 <sup>4</sup> ± 297	3.316 × 10 <sup>4</sup> ± 370	96.4	0.99
③	Fe	3.263 × 10 <sup>4</sup> ± 296	3.316 × 10 <sup>4</sup> ± 370	98.4	0.44
④	Fe	3.288 × 10 <sup>4</sup> ± 278	3.316 × 10 <sup>4</sup> ± 370	99.2	0.48
Microwave	Fe	3.231 × 10 <sup>4</sup> ± 280	3.316 × 10 <sup>4</sup> ± 370	97.4	0.67
①	Mg	1.330 × 10 <sup>4</sup> ± 403	1.428 × 10 <sup>4</sup> ± 420	93.1	0.76
②	Mg	1.388 × 10 <sup>4</sup> ± 394	1.428 × 10 <sup>4</sup> ± 420	97.2	0.35
③	Mg	1.412 × 10 <sup>4</sup> ± 402	1.428 × 10 <sup>4</sup> ± 420	98.9	0.53
④	Mg	1.420 × 10 <sup>4</sup> ± 411	1.428 × 10 <sup>4</sup> ± 420	99.4	0.35
Microwave	Mg	1.291 × 10 <sup>4</sup> ± 400	1.428 × 10 <sup>4</sup> ± 420	90.4	0.41
①	Mn	618.9 ± 17	650 ± 23	95.2	0.49
②	Mn	629.6 ± 21	650 ± 23	96.9	0.38
③	Mn	643.6 ± 20	650 ± 23	99.0	0.23
④	Mn	661.7 ± 18	650 ± 23	102.0	0.14
Microwave	Mn	637.2 ± 20	650 ± 23	98.0	0.74
①	Ti	3577.9 ± 95	3800 ± 120	94.2	0.47
②	Ti	3650.0 ± 91	3800 ± 120	96.1	0.76
③	Ti	3760.7 ± 102	3800 ± 120	99.0	0.25
④	Ti	3766.4 ± 100	3800 ± 120	99.1	0.35
Microwave	Ti	3432.7 ± 112	3800 ± 120	90.3	0.24

表 5 挥发性元素测试结果对比 ( $n=5$ )  
Table 5 Results of volatile element ( $n=5$ )

Method	Element	Average/(mg/kg)	Standard/(mg/kg)	Recovery/%	RSD/%
⑤	As	11.22 ± 0.7	12.7 ± 1.1	88.4	1.5
⑥	As	11.79 ± 0.6	12.7 ± 1.1	92.8	1.9
⑦	As	12.15 ± 0.8	12.7 ± 1.1	95.7	1.4
⑧	As	12.47 ± 0.8	12.7 ± 1.1	98.2	1.4
Microwave	As	12.83 ± 1.0	12.7 ± 1.1	101.0	1.4
⑤	Sb	0.965 ± 0.1	1 ± 0.2	96.5	0.24
⑥	Sb	0.968 ± 0.1	1 ± 0.2	96.8	0.29
⑦	Sb	1.006 ± 0.1	1 ± 0.2	100.6	0.33
⑧	Sb	1.016 ± 0.1	1 ± 0.2	101.6	0.21
Microwave	Sb	0.945 ± 0.1	1 ± 0.2	94.5	0.45

由表 4 和表 5 可知, 1) 当快速消解法和微波消解法的  $\text{HNO}_3\text{-HCl}$  添加量相同时, 微波消解法的回收率略高于快速消解法, 这可能是由于土壤的主要成分为硅酸盐, 微波消解中添加的 HF 能破坏硅酸盐晶格, 使其中的金属完全释放, 同时微波消解在升温的过程中形成密封高压环境有利于金属元素的析出<sup>[17]</sup>。实验过程中适量增加快速消解法中  $\text{HNO}_3\text{-HCl}$  的添加量, 回收率即显著增加。2) 与全自动石墨消解仪相比<sup>[18]</sup>, 本装置消解时间稍长, 但消解仪加盖增温可减少热损失且消解温度稳定。3) 比较不挥发性金属元素中③与④的酸添加量和加标回收率发现, 增加  $\text{HNO}_3$  的添加量, 加标回收率提高不明显, 为降低试剂空白干扰和节省酸用量, 选择方法③中 4.000 mL  $\text{HNO}_3 + 2.000$  mL HCl

酸消解体系消解不挥发性金属元素。同理选择方法⑦中 1.500 mL  $\text{HNO}_3 + 4.000$  mL HCl 酸消解体系消解挥发性金属元素。4) 选择③和⑦酸消解体系, 实验数据相对标准偏差均在 0.19% ~ 1.4%, 加标回收率均在 95.4% ~ 100.6%, 说明该方法检测数据稳定可靠, 准确度高。

### 3 结论

利用快速消解仪为加热设备, 玻璃消解管为加热容器的  $\text{HNO}_3\text{-HCl}$  消解体系, 简化了土壤重金属消解的前处理过程。将快速消解数据与国标微波消解数据比较, 证明快速消解仪能够达到预期效果。该方法降低了对消解设备的要求, 简化了消解步骤, 提高了消解效率。

### 参考文献

- [1] Wei X L, Lei Y D, Ma X N, Wang J, Zhao Y. J Anhu Agricult Sci 2014 42(11):3243  
魏向利, 雷用东, 马小宁, 王静, 赵译. 安徽农业科学 2014 42(11):3243
- [2] Jing X L, Luan C L, Zhou K, Jing M, Zhuang Z X, Wang X R. Chin J Anal Lab 2007 26(1):17  
金兴良, 栾崇林, 周凯, 荆森, 庄峙厦, 王小如. 分析试验室 2007 26(1):17
- [3] Geng Y C. Environ Sci Technol, 2013 26(3):57  
耿勇超. 环境科技 2013, 26(3):57
- [4] Tian K, Xing S C, Yang J, Zhou Y M, Xu P, Sun Z J. Chin J Spectrosc Lab 2012 29(1):247  
田衍, 邢书才, 杨郡, 周裕敏, 徐鹏, 孙自杰. 光谱实验室 2012, 29(1):247
- [5] Falciani R, Novaro E, Marchesini M, Gucciardi M. J Anal Atomic Spectrometr. 2000, 15(5):561
- [6] He T Y, Zhang Y H, Hu Z W. Chin J Anal Lab, 2018 37(1):84  
何恬叶, 张颖红, 胡子文. 分析试验室 2018 37(1):84
- [7] Long J H, Tan J, Wu Y J, Zhu Y, Xu X F. Environ Monitor China 2013 29(1):123  
龙加洪, 谭菊, 吴银菊, 朱奕, 许雄飞. 中国环境监测 2013 29(1):123
- [8] Li H F, Wang Q R, Zhu Y G. Environ Chem 2006 25(1):108  
李海峰, 王庆仁, 朱永官. 环境化学 2006 25(1):108
- [9] Chen M P, Wei J, Jiang J H, Li X, Chen Z L, Wei D L. Chem Reagents, 2015, 37(12):1102  
陈孟鹏, 韦靖, 蒋建宏, 李旭, 陈昭麟, 魏得良. 化学试剂 2015 37(12):1102
- [10] Zhao Z N, Chen G Y, Yang R K. Environ Chem 2017, 36(6):1428

- 赵志南,陈观宇,杨仁康. 环境化学 2017 36(6):1428
- [11] Qian W, Tang H Y, Wang R H, Gong H, Jiang Q, Yu Y C. Chinese J. Anal. Chem. 2017 45(8):1215  
钱 薇,唐昊冶,王如海,龚 华,蒋 倩,俞元春. 分析化学 2017 45(8):1215
- [12] Tian Y, Li J, Song X G, Yang W F, Chen L F, Liu Z G, Zhang L. Environ Sci Manag, 2017 42(4):123  
田 瑜,李 杰,宋献光,杨卫芳,陈粒粉,刘志光,张 亮. 环境科学与管理 2017 42(4):123
- [13] Chen J, Yan Y X, Fei Y, Yao J M, Wu J. Rock Mineral Anal 2009 28(1):25  
陈 江,姚玉鑫,费 勇,姚建民,吴 杰. 岩矿测试 2009 28(1):25
- [14] Wang P, Wang H S, Li Y P. Adm Techn Envir Monit 2008 20(3):41  
王 平,王焕顺,李玉璞. 环境监测管理与技术 2008 20(3):41
- [15] Chen Y H, Zhang H, Shi Y Z, Wang Y F, Li P, John Lau, Steven Wilbur, Wang H Z. Chin Mass Spectr Soc, 2006, 27(S):41  
陈玉红,张 华,施燕支,王英锋,李 平,John Lau; Steven Wilbur,王海舟. 质谱学报 2006 27(增刊):41
- [16] HJ 832 - 2017. Soil and Sedimen-Determination of Mercury, Digestion of the total amount of metal elements  
Microwave Dissolution  
HJ 832 - 2017. 土壤和沉积物 金属元素总量的消解 微波消解法
- [17] Sun X M, Lei M, Li L, Huang Q X. Chin J Anal Lab 2014 33(10):1177  
孙秀敏,雷 敏,李 璐,黄秋鑫. 分析试验室 2014 33(10):1177
- [18] Ding D M, Zhang Z, Wang J L, Li W. Chin J Anal Lab 2016 35(9):1108  
丁冬梅,张 赞,王记鲁,李 纬. 分析试验室 2016 35(9):1108