

# 千瓦级微波等离子体质谱仪研究水体中锰元素

蒋峰<sup>1</sup>, 朱乐辉<sup>1</sup>, 朱志强<sup>2</sup>, 黄正旭<sup>3</sup>, 周振<sup>3</sup>, 蒋涛<sup>3,4</sup>

(1. 南昌大学资源环境与化工学院, 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 江西 南昌 330031;

2. 上饶师范学院化学化工学院, 江西 上饶 334001; 3. 广州禾信仪器股份有限公司, 广东 广州 510700;

4. 湖南农业大学中兽药湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128)

**摘要:**为了使微波等离子体电离源更好地用于分析水溶液中金属元素,本研究基于改进型千瓦级微波等离子体(KMP)电离源耦合线性离子阱质谱仪(LTQ-MS),在新型进样系统(Nafion-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)下,研究水体中锰元素的质谱行为。锰元素的千瓦级微波等离子体质谱(KMP-MS)特征谱图不同于传统的电感耦合等离子体(ICP-MS)获得的特征信号,这可能有助于金属元素分析。使用KMP-LTQ-MS法分析水体中锰的络合物阴离子,证实锰的络合物阴离子是由流经KMP源中心管的水溶液在等离子体火焰中电离产生的,如NO<sub>3</sub><sup>-</sup>。此外,解释了主要离子在逐步碰撞诱导解离过程中特征碎片的形式,并在优化的条件下,使用锰的络合物阴离子二级质谱特征离子评估锰的检测限(LOD)为0.33 μg/L,线性动态范围涵盖至少2个数量级,在0~100 μg/L之间。因KMP源无Ar背景干扰,未来可将其与四极杆质谱结合,能够为水质检测提供新方法。

**关键词:**千瓦级微波等离子体质谱(KMP-MS);碰撞诱导解离;过渡金属;锰元素

中图分类号:O657.63

文献标志码:A

文章编号:1004-2997(2022)04-0504-08

doi:10.7538/zpxb.2021.0213

## Study of Manganese in Water by Kilowatt-Microwave Plasma Mass Spectrometry

JIANG Feng<sup>1</sup>, ZHU Le-hui<sup>1</sup>, ZHU Zhi-qiang<sup>2</sup>, HUANG Zheng-xu<sup>3</sup>,  
ZHOU Zhen<sup>3</sup>, JIANG Tao<sup>3,4</sup>

(1. Key Laboratory of Environment and Resource Utilization of Poyang Lake, Ministry of Education, School of Environment and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Shangrao Normal University, Shangrao 334001, China;

3. Guangzhou Hexin Instruments Co., Ltd. Guangzhou 510700, China;

4. Hunan Key Laboratory of Traditional Chinese Veterinary Medicine, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** Due to the unique ionization properties of microwave plasma, it can be used as an ion source for atmospheric pressure mass spectrometry, both for the analysis of organic small molecules and the detection of inorganic metallic elements. To improve the performance of microwave plasma ionization sources for the analysis of metallic elements in aqueous solutions, the mass spectrometric behaviour of manganese (Mn) in kilowatt-

microwave plasma mass spectrometry (KMP-MS) with a novel injection system (Nafion-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) was investigated. The KMP-MS characteristic spectra of Mn had new features that were significantly different from the characteristic signals obtained by traditional inductively coupled plasma (ICP-MS), which might be useful for the detection of metal elements. The complex anions of Mn in water were analyzed using the KMP-LTQ-MS, confirming that these complex anions were produced by aqueous solutions flowing through the KMP central tube in a plasma flame, such as NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. In addition, the form of the major ions was explained during multi-step collision-induced dissociation. The limit of detection (LOD) of Mn was 0.33 μg/L under the optimized conditions using its secondary mass spectrometric characteristic ions, while the linear dynamic range covered at least two orders of magnitude (0-100 μg/L). This method is suitable for analysis of metal elements in water and Mn ions in real samples. Because there is no Ar background interference in KMP source, the combination of the KMP source and quadrupole mass spectrometry will provide a new powerful analytical tool for multi-element detection in areas, such as environmental pollution, criminal investigation, and geological exploration.

**Key words:** kilowatt-microwave plasma mass spectrometry (KMP-MS); collision-induced dissociation (CID); transition metals; manganese

饮用水是维持人类和社会最重要的资源之一<sup>[1-2]</sup>,其质量容易受到众多人为(如城市、工业和农业活动)和自然过程(如降水输入的变化、侵蚀和地壳物质的风化)的影响。因此,水污染是一个全球性的公共卫生问题,其中重金属位居环境污染物之首<sup>[3]</sup>。锰(Mn)是人体必需的矿物质<sup>[4]</sup>,但环境饮用水中锰含量超标会对中枢神经系统造成损害<sup>[5]</sup>,其在基底神经节和大脑额叶皮层中的积累<sup>[6-8]</sup>,以及与神经心理学测试表现不佳的相关性已在动物和人体实验中得到证实<sup>[9]</sup>。因此,有必要充分了解锰元素的分布以及农村地区人们通过饮用水接触金属的致癌风险。

在金属元素分析方面,目前常用的技术有电感耦合等离子体-原子发射光谱法(ICP-AES)<sup>[10]</sup>、分光光度法<sup>[11]</sup>、原子吸收光谱法(AAS)<sup>[12]</sup>和电感耦合等离子体-质谱法(ICP-MS)<sup>[13]</sup>等。其中,ICP-AES具有灵敏度高、稳定性好等优点,但雾化效率受溶液含盐量及碱性溶液粘度等因素的影响,不适于分析锰等难溶金属;其他方法大多需要较复杂的样品预处理,且ICP-MS运行成本高、耗气量大。

微波等离子体离子源工作稳定、寿命长、安全性能高,能与多种光谱仪联用<sup>[14-15]</sup>,已应用于

食品安全、石油化工、临床医学等领域<sup>[16-17]</sup>。随着微波等离子体离子源微波功率的不断提升,现也用于常压质谱领域,可与多种质谱仪器(如LTQ, TOF)相结合,采用外部直接解析模式已成功检测了一系列有机化合物<sup>[18-19]</sup>。由于输入该离子源的微波功率可调,且具有操作简便、便携、热效应和激发能力强等优点<sup>[17-20]</sup>,有研究开发了微波等离子体在液态有机样品<sup>[21-22]</sup>和固态药物样品<sup>[23]</sup>中的应用。随着等离子体技术的发展,我国开发了千瓦级微波等离子体(kilowatt-microwave plasma, KMP)电离源<sup>[14]</sup>,它兼具了电感耦合等离子体(ICP)和百瓦级微波等离子体炬结构的优点<sup>[24]</sup>,不仅能克服ICP离子源背景离子干扰的缺陷,而且具有微波等离子体的操作简便、功耗低、功率高等特点,可分析大多数元素。

为了拓宽千瓦级微波等离子体质谱(KMP-MS)技术的应用范畴,实现农业用水中金属络合离子的检测分析,研究水体中常见金属元素的质谱特征。本工作拟以锰元素为研究对象,总结其在KMP中所形成的金属络合物阴离子的质谱行为,阐明形成规律,旨在丰富金属元素的检测方式和KMP-MS在实际水质检测中的应用提供方法参考。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与装置

iCAP RQ 电感耦合等离子体质谱仪;美国 Thermo Fisher 科技有限公司产品;LTQ-XL 型线性离子阱质谱仪(LTQ-MS);美国 Finnigan 公司产品,利用 Xcalibur 系统控制数据的采集及处理;千瓦级微波等离子体源和 WGY-20 微波功率源;由浙江大学金钦汉教授课题组提供;超纯水仪;美国 Thermo Fisher 科技有限公司产品;Nafion 管;美国博纯公司产品。

### 1.2 材料与试剂

1 000 mg/L 锰元素标准溶液;国家有色金属及电子材料分析测试中心产品,均溶于 1 mol/L  $\text{HNO}_3$  介质;浓硫酸(分析纯)和硝酸(分析纯,65.0%~68.0%);天津市大茂化学试剂厂产品;去离子水(18.2  $\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ );由 Milli-Q 超纯水仪制得。

### 1.3 实验条件

LTQ-MS 负离子检测模式,离子传输管温度 150  $^\circ\text{C}$ ,质量扫描范围  $m/z$  50~500,其他参数自动优化;KMP 源的支持气(Ar)流速 400 mL/min,载气(Ar)流速 1 100 mL/min;微波源输出功率设定为 130 W<sup>[15]</sup>。

### 1.4 实验方法

KMP-LTQ-MS 实验装置示于图 1。将锰元素标准溶液稀释至合适浓度(通常为 100  $\mu\text{g/L}$ ),直接用于新型雾化装置产生气溶胶;气溶胶首先流经 Nafion 管初步干燥,然后流经装

有浓硫酸的干燥瓶充分干燥,干燥后的气溶胶由 Kilowatt-MP 源的中心管道导入 KMP 源产生的等离子体中;等离子体火焰尖端距质谱进样口约 10 mm,离子在压力差的驱使下进入 LTQ-MS 分析,获得特征谱图;使用 Excel 和 OriginPro 8.5.1 软件处理数据, Surfer 8.0 软件构建质谱成像图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 锰的 KMP 质谱图

锰的天然同位素仅有  $^{55}\text{Mn}$ 。以 100  $\mu\text{g/L}$  锰标准溶液进样,特征谱图中主要离子峰为  $m/z$  125 ( $\text{HNO}_3$ ) $\text{NO}_3^-$  和  $m/z$  62  $\text{NO}_3^-$ <sup>[23]</sup>,但这些峰均不是锰的特征信号,而是背景离子信号,示于图 2。通过放大  $m/z$  220~250 范围,发现了明显的特征离子峰  $m/z$  241,初步推测为锰元素的特征离子。通过对总离子流图和选择性离子流图进行确认,发现总离子流图无明显进样变化,而选择性离子流图( $m/z$  241)呈现出 3 次平行进样峰,示于图 3。因此,可以确认  $m/z$  241 来源于锰标准溶液,即锰元素的特征离子为  $m/z$  241。

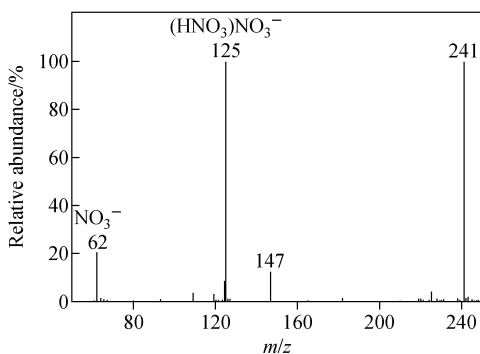
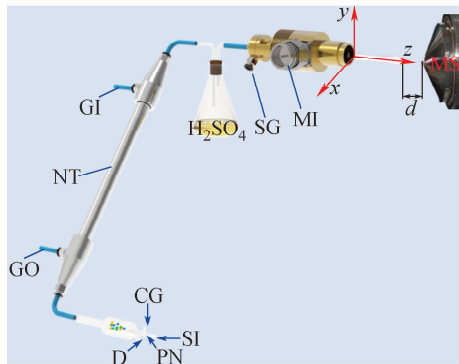


图 2 锰标准溶液的 KMP-LTQ-MS 定性分析

Fig. 2 Qualitative analysis of manganese standard solution by KMP-LTQ-MS

### 2.2 锰的 KMP 多级质谱图

在 LTQ-MS 负离子模式下,金属元素(M)易与  $\text{NO}_3^-$  离子结合形成加合离子  $[\text{M}(\text{NO}_3)_n]^-$ <sup>[24-25]</sup>。假设在 KMP-LTQ-MS 方法下,锰元素的特征离子( $m/z$  241)表现形式为  $[\text{Mn}(\text{NO}_3)_3]^-$ ,为了准确认定这些质谱信号,对  $m/z$  241 离子进行碰撞诱导解离(CID)实验。设置毛细管电



注:SI:样品引入端;PN:雾化器;CG:载气输入口;  
D:废液口;GO:出气口;NT:Nafion管;GI:进气口;  
SG:支持气输入口;MI:微波输入端

图 1 KMP-LTQ-MS 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic illustration of KMP-LTQ-MS

压-3 V、透镜电压-32.11 V、毛细管温度150.1 °C,碰撞能量31 eV。母离子  $m/z$  241 的二级质谱图示于图 4a,其丢失 46 u ( $^{14}\text{N}^{16}\text{O}_2^-$ ) 形成  $m/z$  195 碎片离子;而低丰度碎片离子  $m/z$  213 为母离子丢失 28 u ( $\text{N}_2$ ),可认为其离子结构为  $[\text{Mn}(\text{O}_3)_6]^-$ 。 $m/z$  241 的三级质谱图示于图 4b,即以次级母离子  $m/z$  195 进行 CID 实验的结果。 $m/z$  241 失去 76 u ( $^{14}\text{N}^{16}\text{O} + ^{14}\text{N}^{16}\text{O}_2^-$ ) 产生  $m/z$  119  $[\text{Mn}^{16}\text{O}_4]^-$ ;次级母离子  $m/z$  195 中性丢失 30 u (NO) 和 17 u,分别产生  $m/z$  165 和  $m/z$  148 子离子,但  $m/z$  148 结构尚未解析出来。然而,在 CID 过程中,负离子模式下经常出现丢失 46 u ( $^{14}\text{N}^{16}\text{O}_2^-$ ) 和 76 u ( $^{14}\text{N}^{16}\text{O} + ^{14}\text{N}^{16}\text{O}_2^-$ ) 的碎片离子<sup>[15,23]</sup>,最终得到的  $m/z$  119 质谱峰无法通过 CID 过程解离,根据文献<sup>[26]</sup>确认其为  $[\text{Mn}^{16}\text{O}_4]^-$ 。

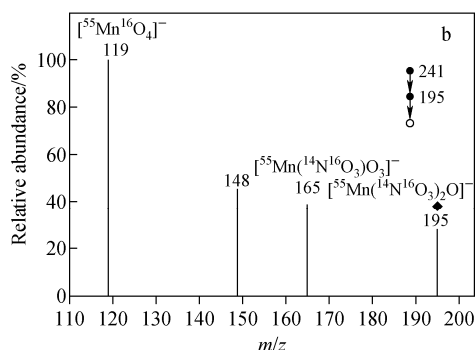
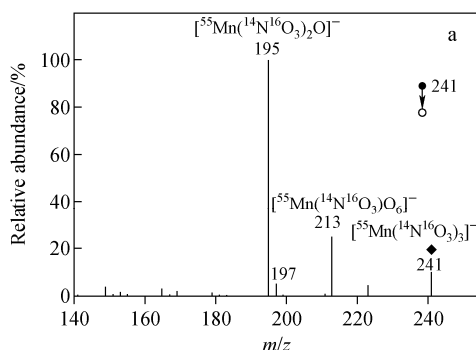


图 4 锰的二级(a)和三级(b)KMP-LTQ 质谱图

Fig. 4 KMP-LTQ-MS<sup>2</sup> (a) and KMP-LTQ-MS<sup>3</sup> (b) spectra of manganese standard solution

## 2.3 条件优化

**2.3.1 Kilowatt-MP 炬焰空间位置对锰离子强度的影响** 本实验利用二维移动平台研究 KMP 源焰炬与质谱口之间的位置对目标信号的影响,结果示于图 5。固定 KMP 源焰炬与质谱口共线且距离  $z$  为 20 mm(初始位置),此时  $x=10$  mm( $x$  轴表示 KMP 源焰炬中心轴线与质谱口轴线之间的偏离程度, $z$  轴表示 KMP 源焰炬尖端与质谱口之间的距离程度)。可见,当  $x=(10 \pm 2)$  mm,且  $z=(6 \pm 2)$  mm 时,信号强度最好。实验中,KMP 源焰炬不能更加靠近质谱仪,以免产生放电,影响仪器检测性能。

**2.3.2 放电气体对锰离子强度的影响** 为了获得稳定的等离子体,对 KMP 放电过程的支

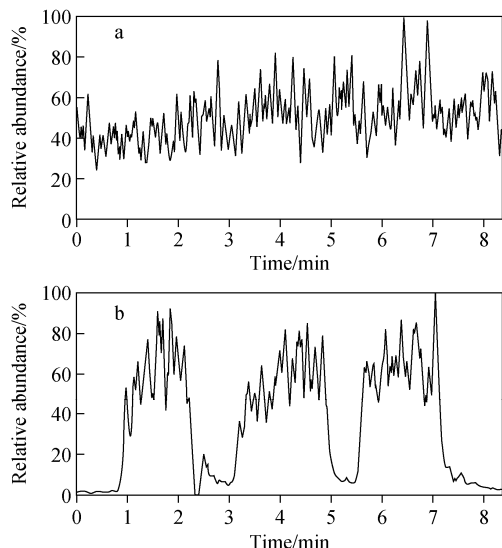


图 3 锰标准溶液的总离子流图(a)和选择性离子流图(b)

Fig. 3 Total ion chromatograph (a) and selective ion chromatograph (b) of manganese standard solution

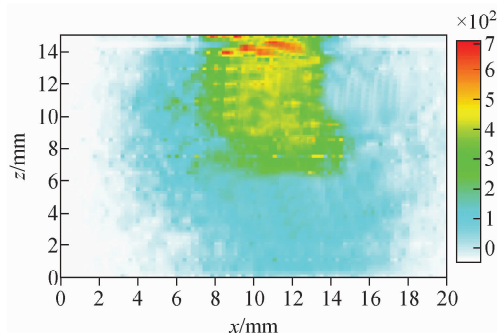


图 5 KMP 炬焰空间位置对锰加合离子 ( $m/z$  195) 强度的影响

Fig. 5 Effect of spatial position of the KMP torch flame on the intensity of the manganese adduct ion ( $m/z$  195)

持气流速和载气流速进行优化,其结果示于图6。从图6a可知,KMP点火主要受支持气的影响,当支持气流速小于200 mL/min时,等离子体炬焰可以在没有载气的情况下点燃,但不稳定;随着支持气流速增大到400 mL/min,等离子体炬焰向外延伸,达到稳定状态;当支持气流速高于400 mL/min时,等离子体焰炬被高速气流扰动变得不稳定。因此,采用支持气流速400 mL/min。此外,分析物在等离子体区域的停留时间也受支持气流速的影响,为了获得 $m/z$  195的最大信号强度,优化支持气流速为400 mL/min。从图6b可见,载气流速小于600 mL/min时,低流速使气溶胶中的水份吸收了等离子体中的能量,因而没有充足的能量解吸气溶胶中的锰,导致锰离子强度较低;随着载气流速增加,大量的分析物被引

入等离子体且气溶胶中的水份被快速带走,在流速1 100 mL/min时, $m/z$  195信号强度达到最大;随着流速继续增加,等离子体分析目标物质的时间变短。因此,本实验选择载气流速为1 100 mL/min。

#### 2.4 校准曲线绘制

本实验比较了KMP-LTQ-MS法和ICP-Q-MS法的锰标准溶液(0~100  $\mu\text{g/L}$ )校准曲线,分别示于图7和列于表1。结果表明,两种方法的定量分析性能均能满足国家标准的饮用水中锰的上限值100  $\mu\text{g/L}$ <sup>[27]</sup>,其中KMP-LTQ-MS法的检测限(0.33  $\mu\text{g/L}$ )高于ICP-Q-MS法的检测限(0.01  $\mu\text{g/L}$ );KMP-LTQ-MS法的相对标准偏差为0.95%~14.1%,与ICP-Q-MS法的1.32%~9.9%接近;两种方法的线性关系良好,相关系数( $R^2$ )均大于0.99。因此,KMP-

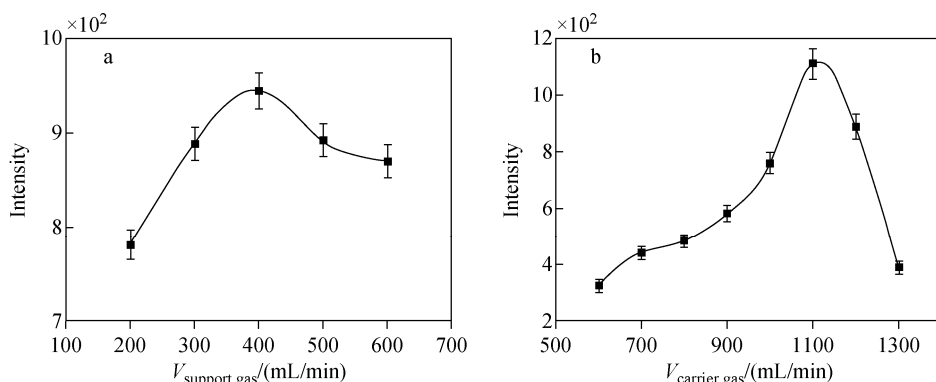
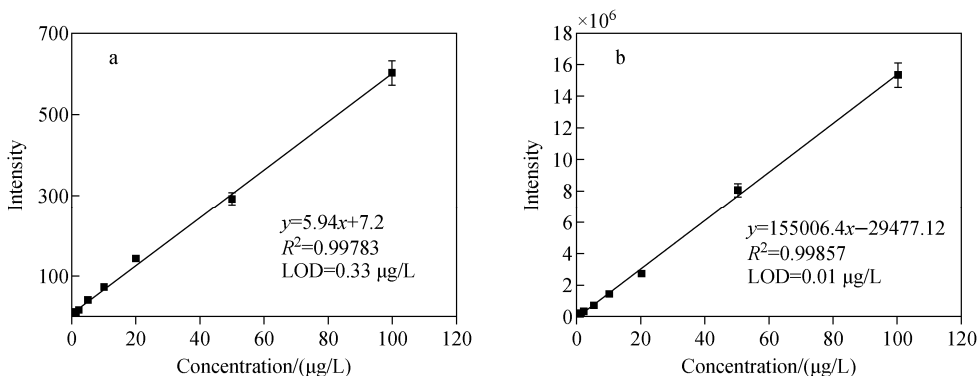


图6 支持气流速(a)和载气流速(b)对锰加合离子( $m/z$  195)强度的影响

Fig. 6 Effects of support gas flow rate (a) and carrier gas flow rate (b) on the intensity of the manganese adduct ion ( $m/z$  195)



注:a. KMP-LTQ-MS校准曲线;b. 商用ICP-Q-MS校准曲线

图7 锰元素特征离子强度与浓度的关系

Fig. 7 Relationship between the intensity of characteristic ion and the concentration of manganese

LTQ-MS法可满足饮用水中金属元素的分析要求,但由于KMP离子源技术还处于完善阶段,目前该方法的性能尚无法达到商用ICP-Q-MS标准。

## 2.5 实际样品分析

采用KMP-LTQ-MS法分析鄱阳湖水样,

测得样品中锰含量为 $3.34 \sim 33.8 \mu\text{g/L}$ 。向5 mL水样中加入 $2.5 \mu\text{L}$   $10 \text{ mg/L}$  锰标准品进行回收率实验,测得的回收率在 $80.3\% \sim 108.1\%$ 之间(除样品8异常外),结果列于表2。该方法适合检测实际水样中锰含量是否超标。

表1 KMP-LTQ-MS和ICP-Q-MS方法分析水中锰的定量结果

Table 1 Quantitative results of manganese in aqueous solution by KMP-LTQ-MS and ICP-Q-MS

方法 Method	线性方程 Linear equation	相关系数 Correlation coefficient ( $R^2$ )	线性范围 Linear range/ $(\mu\text{g/L})$	检出限 LOD/ $(\mu\text{g/L})$	相对标准 偏差 RSD/% ( $n=5$ )
KMP-LTQ-MS	$y=5.94x+7.2$	0.99783	0~100	0.33	0.95~14.1
ICP-Q-MS	$y=155006x-29477.12$	0.99857	0~100	0.01	1.32~9.9

表2 KMP-LTQ-MS分析水样和加标水样的结果

Table 2 Analytical results of water samples and spiked water samples by KMP-LTQ-MS

实际样品 Practical water sample	初始测定值 Initial measured value/ $(\mu\text{g/L})$	加标量 Spiked/ $(\mu\text{g/L})$	加标测定值 Spiked measurement value/ $(\mu\text{g/L})$	回收率 Recovery/% ( $n=3$ )
样品1	3.34	5	8.23	97.9
样品2	33.80	5	39.08	105.5
样品3	23.11	5	28.33	104.5
样品4	25.81	5	31.22	108.1
样品5	19.73	5	23.98	85.1
样品6	10.35	5	15.23	97.5
样品7	4.62	5	9.27	92.9
样品8	16.89	5	20.62	74.5
样品9	18.96	5	23.54	91.6
样品10	7.42	5	11.60	83.6
样品11	10.18	5	14.40	84.4
样品12	4.46	5	9.00	90.7
样品13	13.05	5	17.07	80.3
样品14	16.82	5	22.07	105.0

注:取样点(1—湖口,2—饶河口,3—中洲,4—都昌,5—常湖,6—虎山,7—轮湖,8—星子,9—小摊湖,10—大湖,11—排门咀,12—茅山湖,13—龙口,14—莲湖)

## 3 结论

本研究在无需或仅需少量样品预处理的条件下,利用微波等离子体质谱技术直接检测水样中锰含量。采用KMP与LTQ-MS联用,以KMP中心管道方式进样,辅以新型Nafion-

$\text{H}_2\text{SO}_4$ 去溶系统,能够检测鄱阳湖水样中痕量锰。由于KMP离子源技术还处于完善阶段,目前该方法的性能尚无法达到商用ICP-Q-MS标准。但该新型等离子体的整体设备成本低,无Ar背景离子干扰,可与小型线性离子阱质

谱联用,有望发展成为一种便携式分析仪,在检测水样中锰含量方面具有一定的应用潜力。

### 参考文献:

- [1] CODY R B, LARAMÉE J A, DURST H D. Versatile new ion source for the analysis of materials in open air under ambient conditions[J]. *Analytical Chemistry*, 2005, 77(8): 2 297-2 302.
- [2] TAKÁTS Z, WISEMAN J M, GOLOGAN B, COOKS R G. Mass spectrometry sampling under ambient conditions with desorption electrospray ionization[J]. *Science*, 2004, 306(5 695): 471-473.
- [3] MONGE M E, HARRIS G A, DWIVEDI P, FERNANDEZ F M. Mass spectrometry: recent advances in direct open air surface sampling/ionization[J]. *Chemical Reviews*, 2013, 113(4): 2 269-2 308.
- [4] COOKS R G, OUYANG Z, TAKATS Z, WISEMAN J M. Ambient mass spectrometry [J]. *Science*, 2006, 311(5 767): 1 566-1 570.
- [5] SMOLUCH M, MIELCZAREK P, SILBERRING J. Plasma-based ambient ionization mass spectrometry in bioanalytical sciences[J]. *Mass Spectrometry Reviews*, 2016, 35(1): 22-34.
- [6] LASKIN J, HEATH B S, ROACH P J, CAZARES L, SEMMES O J. Tissue imaging using nanospray desorption electrospray ionization mass spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 2012, 84(1): 141-148.
- [7] ROBICHAUD G, BARRY J A, GARRARD K P, MUDDIMAN D C. Infrared matrix-assisted laser desorption electrospray ionization (IR-MALDESI) imaging source coupled to a FT-ICR mass spectrometer[J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2013, 24(1): 92-100.
- [8] PFEUFFER K P, WHITE A, BROEKAERT J A C, HIEFTJE G M. Afterglow of a microwave microstrip plasma as an ion source for mass spectrometry[J]. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*, 2015, 103: 43-48.
- [9] ZHAO Z J, LI D D, WANG B, DING X L, DAI J X, YUAN X, LI X M, DUAN Y X. A systematic study of the distinctive character of microwave induced plasma desorption/ionization (MIPDI) mass spectrometry: is it a soft or a hard ion source?[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2015, 376: 65-74.
- [10] MEDVEDEV N S, SHAVERINA A V, TSYGANKOVA A R, SAPRYKIN A I. Analysis of high-purity germanium dioxide by ETV-ICP-AES with preliminary concentration of trace elements [J]. *Talanta*, 2016, 155: 358-362.
- [11] CHEN B, HU L, CHEN Y, SUN Y. Recent progress of research on methods for determination of total tin in geological samples[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis*, 2017, 53(2): 236-241.
- [12] PANCRAS J P, ONDOV J M, ZEISLER R. Multi-element electrothermal AAS determination of 11 marker elements in fine ambient aerosol slurry samples collected with SEAS-II[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2005, 538(1/2): 303-312.
- [13] RUHLAND D, NWOKO K, PEREZ M, FELDMANN J, KRUPP E M. AF4-UV-MALS-ICP-MS/MS, spICP-MS, and stem-EDX for the characterization of metal-containing nanoparticles in gas condensates from petroleum hydrocarbon samples[J]. *Analytical Chemistry*, 2019, 91(1): 1 164-1 170.
- [14] ZHU D, JIN W, YU B W, YING Y W, YU H X, SHAN J, YAN Y W, JIN Q H. Investigation of self-ignition characteristics of the microwave plasma torch[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2017, 32(8): 1 595-1 600.
- [15] 金伟,于丙文,朱旦,应仰威,于海翔,金钦汉. 一种原子光谱分析用新激发光源——千瓦级微波等离子体炬(kW-MPT)[J]. *高等学校化学学报*, 2015,36(11):2 157-2 159.
- JIN Wei, YU Bingwen, ZHU Dan, YING Yangwei, YU Haixiang, JIN Qinhan. Development of a new kilowatt microwave plasma torch (kW-MPT) excitation source for atomic emission spectrometry[J]. *Chemical Journal of Chinese University*, 2015, 36(11): 2 157-2 159(in Chinese).
- [16] 姜杰,费强,冯国栋,窦文超,李明,金钦汉. 电热蒸发-微波等离子体炬全谱仪检测血清中钙、镁和铁[J]. *分析化学*,2007,35(1):91-94.
- JIANG Jie, FEI Qiang, FENG Guodong, DOU Wenchao, LI Ming, JIN Qinhan. Direct determination of Ca, Mg and Fe in serum by using a simultaneous microwave plasma torch spectrometer coupled with an improved electrothermal vaporization

- zation device[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2007, 35(1): 91-94(in Chinese).
- [17] 赵丽,张金生,李丽华. 微波消解-微波等离子体炬原子发射光谱法测定膨化食品中铅和铝[J]. 分析科学学报, 2014, 30(4): 563-565.  
ZHAO Li, ZHANG Jinsheng, LI Lihua. Determination of plumbum and aluminum in puffed food by microwave digestion microwave plasma torch atomic emission spectrometry[J]. Journal of Analytical Science, 2014, 30(4): 563-565(in Chinese).
- [18] JIANG T, PENG Z, XIE M, FANG X, HONG Y, HUANG Z, GAO W, ZHOU Z, LI L, ZHU Z. Rapid analysis of tetracycline in honey by microwave plasma torch mass spectrometry with ablation samples[J]. Analytical Methods, 2020, 12(4): 535-543.
- [19] ZHANG Y, YUAN L, HE S, TAO H, XIE W, ZHANG X, REN X, JIANG T, LI L, ZHU Z. The contemporary research progress on the detection of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(5): 2 790.
- [20] WANG Y, XU L, ZHU H, DONG J, CHENG P, ZHOU Z. Spray-inlet microwave plasma torch and low temperature plasma ionization for ambient mass spectrometry of agrochemicals[J]. Analytical Methods, 2019, 11(42): 5 421-5 430.
- [21] ZHANG H, BIBI A S, LU H Y, HAN J, CHEN H W. Comparative study on ambient ionization methods for direct analysis of navel orange tissues by mass spectrometry[J]. Journal of Mass Spectrometry, 2017, 52(8): 526-533.
- [22] JIANG T, JIANG F, LIU H, YUAN L, MO T, HUANG Z, LI X, LI L, ZHU Z, ZHOU Z. An easy and simple kilowatt-MPT-MS-based metal elements analysis method for rapid environmental water monitoring: an example from poyang lake of China[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2020, 13(11): 7 939-7 952.
- [23] JIANG T, XIONG X H, WANG S X, LUO Y L, FEI Q, YU A M, ZHU Z Q. Direct mass spectrometric analysis of zinc and cadmium in water by microwave plasma torch coupled with a linear ion trap mass spectrometer[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2016, 399/400: 33-39.
- [24] JIANG T, JIANG F, ZHUO Z, LIU H, HU B, LI M, LI L, HUANG Z, ZHOU Z, ZHU Z. Comparative study on a kilowatt-MPT-MS-based method with two ion polarity modes for the inert palladium metal[J]. Analyst, 2021, 146(5): 1 760-1 771.
- [25] XIONG X H, JIANG T, QI W H, ZUO J, YANG M L, FEI Q, XIAO S J, YU A M, ZHU Z Q, CHEN H W. Some rare earth elements analysis by microwave plasma torch coupled with the linear ion trap mass spectrometry[J]. Int J Anal Chem, 2015, doi: 10.1155/2015/156509.
- [26] LI Y, YANG M L, SUN R, ZHONG T, CHEN H W. Detection of uranium in industrial and mines samples by microwave plasma torch mass spectrometry[J]. Journal of Mass Spectrometry, 2016, 51(2): 159-164.
- [27] GB 5750.6—2006 生活饮用水标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.  
(收稿日期: 2021-12-24; 修回日期: 2022-03-22)