第11卷第5期
2021年10月
中国无机分析化学
Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry
Vol. 11, No. 5
9～17

doi:10.3969/j.issn.2095-1035.2021.05.002

气体组分的离子色谱分析检测技术

韩兴昊[1]　寿　旦[2]　金米聪[3]　朱　岩[4,5*]

（1. 西藏农牧学院 公共教学部，西藏 林芝 860000；
2. 浙江省中医药研究院 中药研究中心，杭州 310007；
3. 宁波市疾病预防控制中心，浙江省微量有毒化学物健康风险评估技术研究重点实验室，浙江 宁波 315010；
4. 浙江大学化学系，杭州 310027；
5. 浙江大学 浙江省微量有毒化学物健康风险评估技术研究重点实验室，杭州 310027）

摘　要　传统的离子色谱主要应用于水溶液中的阴、阳离子和极性化合物。随着离子色谱应用范围的扩大，通过合适的样品制备，将非水溶液的样品转化为水溶液，包括有机溶剂、固体样品和气态样品，特别是随着我们对大气环境、气体纯度以及呼出气体中气态样品的组成等方面的重视，越来越多的气体和气态样品，特别是离子态和极性化合物，可通过合适的样品制备、采集转化为水溶液，通过离子色谱技术进行分析。综述了气体组分的离子色谱检测技术，总结了气体样品、气溶胶以及液态样品中气体物质的制备和采集方法，运用离子色谱技术对上述样品进行测定，并对该技术运用过程中存在的问题及发展前景进行了展望。

关键词　气体组分；离子色谱；离子态；极性化合物

中图分类号：O657.7；TH833　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2095-1035(2021)05-0009-09

Analysis and Detection Technology of Gas Components by Ion Chromatography

HAN Xinghao[1], SHOU Dan[2], JIN Micong[3], ZHU Yan[4,5*]

(*1. Public Teaching Department, Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, Nyingchi, Tibet 860000, China;*
2. Department of Medicine, Zhejiang Academy of Traditional Chinese Medicine, Hangzhou, Zhejiang 310007, China;
3. Key Laboratory of Health Risk Appraisal for Trace Toxic Chemicals of Zhejiang Province, Ningbo Municipal Center for Disease Control and Prevention, Ningbo, Zhejiang 315010, China;
4. Department of Chemistry, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;
5. Key Laboratory of Health Risk Appraisal for Trace Toxic Chemicals of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract　Traditional ion chromatography is mainly applied to anionic, cationic and polar compounds in aqueous solution. With the expansion of the application scope of ion chromatography, through the

收稿日期：2021-04-02　　**修回日期**：2021-05-25

基金项目：国家自然科学基金项目(21974121)

作者简介：韩兴昊，男，讲师，主要从事应用化学，农林产品分析，离子色谱相关研究。E-mail：hanxinghao@xza.edu.cn

* **通信作者**：朱岩，男，教授，主要从事分析化学，离子色谱相关研究。E-mail：zhuyan@zju.edu.cn

引用格式：韩兴昊，寿旦，金米聪，等．气体组分的离子色谱分析检测技术[J]．中国无机分析化学，2021，11(5)：9-17．
HAN Xinghao, SHOU Dan, JIN Micong, et al. Analysis and Detection Technology of Gas Components by Ion Chromatography[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2021, 11(5): 9-17.

appropriate sample preparation, the samples of non-aqueous solution can be transformed into aqueous solution, including organic solvents, solid samples and gaseous samples. Especially with our attention to the atmospheric environment, gas purity and the composition of gaseous samples in exhaled gas, more and more gas and gaseous samples, especially ionic and polar samples, are produced. These compounds can be converted into aqueous solution by appropriate sample preparation and collection, and analyzed by ion chromatography. This paper reviews the ion chromatography detection technology of gas components, summarizes the preparation and collection methods of gas substances in gas samples, aerosols and liquid samples, and uses ion chromatography technology to determine the above samples. The problems in the application of this technology and its development prospect are also discussed.

Keywords gas composition; ion chromatography(IC); ionic; polar; samples

1 气体样品的制备

离子色谱法测定气体样品，首先需要将气体样品转化为水溶液。该过程最通用的方法，可以采用水溶液的吸收剂吸收、也可以采用通过膜吸收等特定装置或者燃烧将气体释放之后再用水溶液的吸收剂吸收。

将气体通入吸收液或气体采样器采样，一般情况下吸收液装在 U 型管中，为了确保被测组分能够完全吸收，可以采用串联的吸收管对被测组分吸收并在测定前合并吸收液测定。对于酸性气体或阴离子组分的吸收，可以通过碱性溶液或者离子色谱的流动相来实现[1-6]，或者采用冷凝收集的方法，将大气采样器与定制的半导体冷凝装置联用，收集大气中可溶性阴离子成分[7]，也可以采用滤膜[8-10]、硅胶管[11]、固体吸收管[12]，对于有机化合物组分可以采用活性炭[13]来吸收，然后再转化到水溶液中，此外，气体样品也可以采用环形扩散管（Annular denuder）[14]、自动洗脱线圈（Stripping Coil）[15]和扩散洗涤器（Diffusion scrubber）[16]吸收，图 1 和图 2 分别为自动洗脱线圈（Stripping coil）采集和扩散洗涤器（Diffusion scrubber）的示意图。部分气体样品的组分可以通过特定的方式转化，如硫通过管式炉转化为硫酸根[17]、氟和氯通过水气蒸馏转化为氟和氯离子[18]或硫酸雾通过微波消解硫酸根[19]。

在许多场合，气体组分的采集也可以采用无动力被动方法，这种被动采样方法无需电源动力和专业人员操作、体积小、无噪音污染、可大批量采样，尤其适合微小环境，密闭环境采样如博物馆的气体样品，一般情况被动式采样可以采用扩散式采样器[20-21]和徽章式采样器[22]，图 3 和图 4 分别为扩散式采样器和徽章式采样器的示意图。有关被动采样和在文物保护的应用，有专门的综述总结[23]。

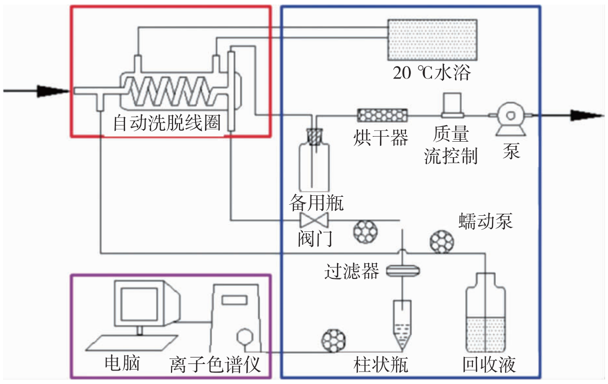


图 1 洗脱线圈-离子色谱(SC-IC)示意图

Figure 1 Schematic diagram of stripping coil-ion chromatography.

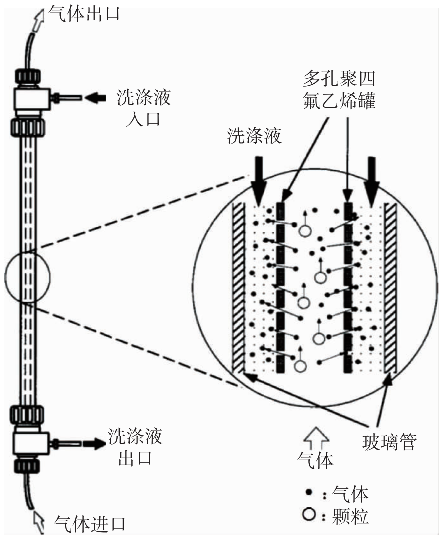


图 2 用于收集大气上酸性和碱性气体的多孔聚四氟乙烯管的扩散洗涤器

Figure 2 Diffusion scrubber with porous PTFE tubes for collecting acidic and alkaline gases in the atmosphere.

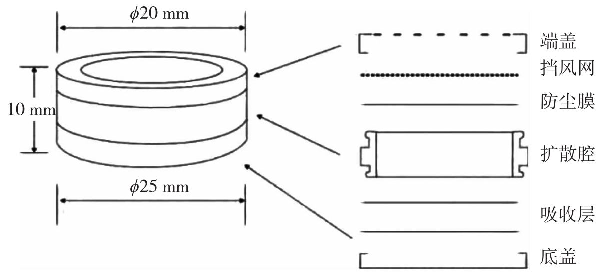


图 3　无动力扩散采样器结构图

Figure 3　Structure diagram of unpowered diffusion sampler(Composed of end cover, the wind net, dust-proof, diffusion chamber, absorption layer and bottom cover).

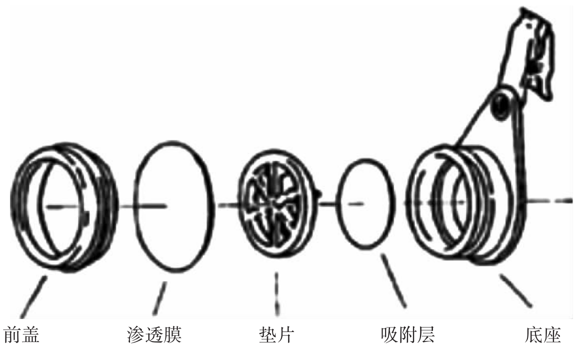


图 4　徽章型采样器

Figure 4　Badge sampler.

而碱性气体或阳离子组分，一般情况下采用酸性溶液吸收[24]，并通过控制气体样品的体积以控制吸收液的浓度以达到有效测定的目的。碱性气体或阳离子成分如氨和胺，也可以用树脂来收集，并通过在线洗脱离子色谱分析[25]，图 5 为阳离子交换采集和洗脱卡套的示意图。也可以平板扩散洗脱器[26]或圆桶扩散洗脱器 CLOUD 室[27]上收集，图 6 和图 7 分别为平板扩散洗脱器和 CLOUD 室的示意图。此外，采用混合纤维素滤膜也可以用于阳离子或碱性化合物的收集[28]。氨气也可以用扩散洗涤器(diffusion scrubber)采集[29]。

有时为了让被测组分能够转化成离子色谱易测的组分或离子，也可以加入合适的氧化剂如过氧化氢和高锰酸钾，或者其他类型的转化形式如在碱性乙醇条件下将 CS_2 转化为乙基黄原酸[30]。

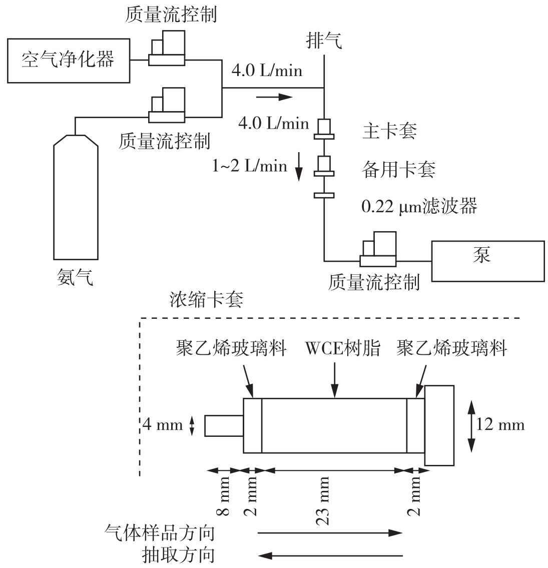
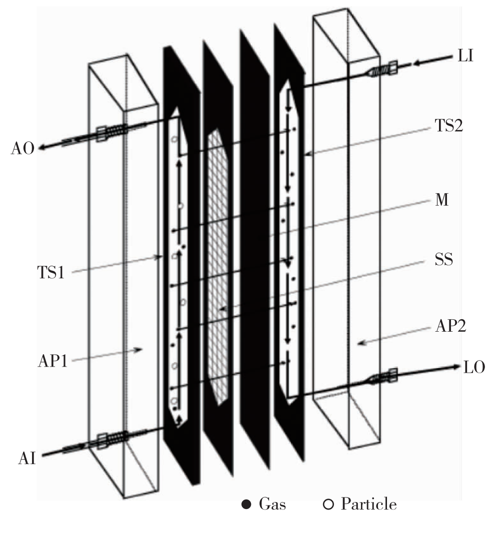


图 5　用于氨和胺收集和洗脱阳离子交换卡套的实验系统示意图(插入图为浓缩卡套的示意图)

Figure 5　Schematic of experimental system used to determine cartridge measurement efficiency (Inset shows a detailed view of the "high-concentration" cartridge).



AI—空气进口；AO—空气出口；AP1，AP2—亚克力护板；TS1—PTFE 空气通道；TS2—PTFE 液相通道；SS—不锈钢屏；M—微孔膜；LI—液体进口；LO—液体出口

图 6　平板扩散洗脱器的结构

Figure 6　Structure of plate diffusion elutor.

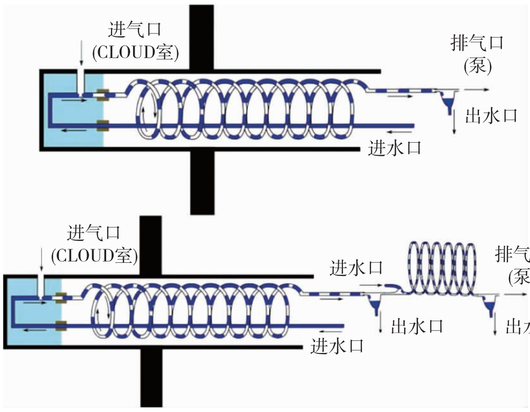


图 7　CLOUD(上图)和改进的带双洗脱器的采样器(下图)示意图

Figure 7　Schematic diagram of cloud(above) and improved sampler with double elutor(below).

2　气溶胶样品中组分的采集

与气体样品不同,气溶胶样品虽然也直接来自于大气,但一般无法直接用水溶液直接吸收采集,一般根据离线和在线两种方法,而一般实验室离线方法可以考虑采用滤膜等采集颗粒,再用去离子水洗脱进行分析,可采用阴离子交换和电导检测分析阴阳离子[31-32]和可溶性组分[33]。如果采用柱后衍生可见光检测也可以测定过滤金属[34]。而采用滤膜采集法,同样也可以对低分子量胺[35]和羧酸[36]进行测定,两种方法与 GC-MS 法基本一致,但离子色谱法更为简便,可靠。

与离线的滤膜收集方法不同,气溶胶的在线采集有多种不同的方式。如半连续采样的颗粒离子色谱(Gas particle ion chromatograph)可以测定硫酸根等[37]。图 8 为 GP-IC 组成的显示图。湿馏分扩散洗脱器-气溶胶收集器(Effluent diffusion denuder-aerosol collector coupled)[38]可以用于气溶胶的氮氧化物分析。图 9 为湿馏分扩散洗脱器-气溶胶收集器(Effluent diffusion denuder-aerosol collector coupled)的结构示意图。图 10 为热转化系统,可以将气溶胶收集并引入化学发光法测定硝酸盐[39],该方法也应该可以应用于离子色谱分析。

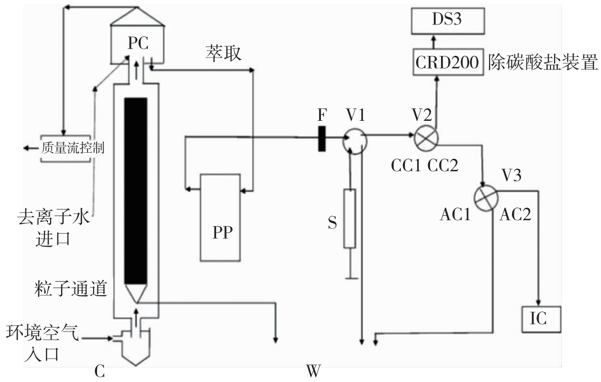


图 8　GP-IC 组件的功能示意图

Figure 8　Functional Schematic of GP-IC components.

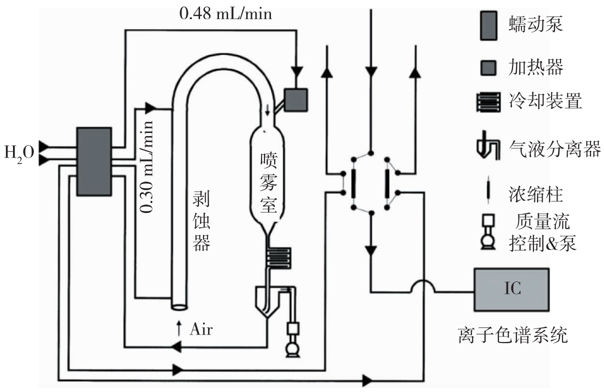


图 9　馏分扩散洗脱器-气溶胶收集器设计示意图

Figure 9　Design diagram of effluent diffusion denuder-aerosol collector coupled.

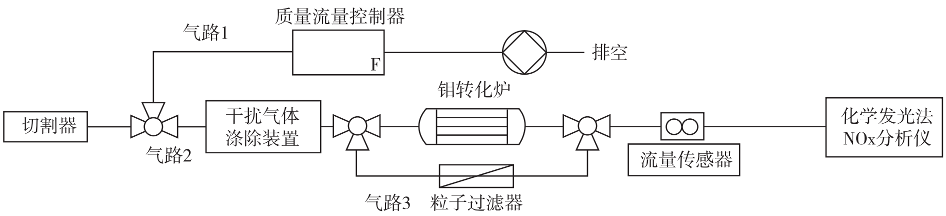


图 10　热转化系统的气路示意图

Figure 10　Schematic diagram of gas circuit of heat conversion system.

3 液态样品中气体物质的采集及吸收

液体中的可挥发物质包括许多离子态化合物，均可以采用特定的方法采集，然后用离子色谱法分析，一般情况下液体样品可以直接稀释或萃取，阴离子或酸性化合物可以用碱性溶液，如采用碱性条件下氯胺-T 和紫外光照下将 SCN^-、CNO^-、CN^- 及金属氰化物全部转化为 CNO^-，从而实现各种形态氰化物总量和六价铬的同时分析[40]，而自由氰同样可以用氯胺-T 加热转化为 CNO^-[41]，检测都可以用阴离子交换色谱抑制电导检测；而生物体液中的 CN^- 也可以通过阴离子交换色谱脉冲安培检测直接测定[42]，而对于红酒中 SO_2 可以用过氧化氢转化为 SO_4^{2-} 再用离子色谱测定[43]。而阳离子或碱性化合物可以用酸性溶液或水溶液直接稀释测定，如炼油工业中的胺类化合物，就可以通过样品稀释后直接进样测定[44]。

对于比较复杂的基体中，气体物质可以通过适合的前处理再进入离子色谱分析，如采用气化之后再进入气膜扩散采集，这种方法可以用于总氰和硫化物[45]和氨[46]的在线分析（图 11）。

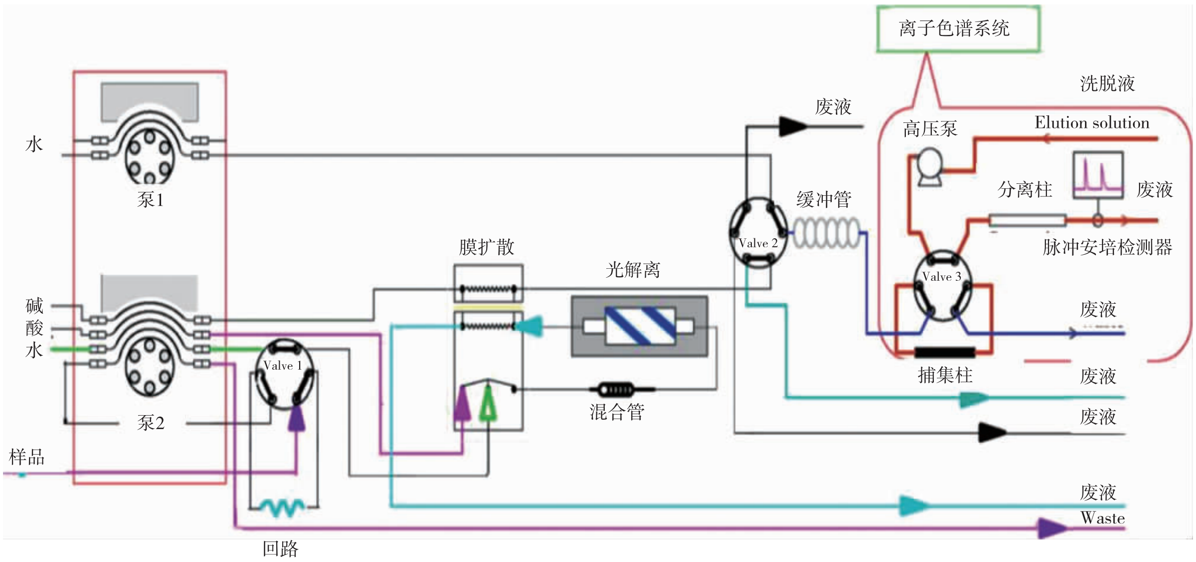
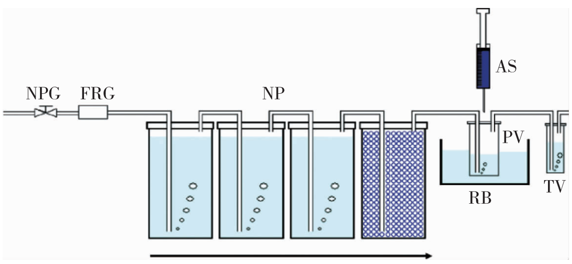


图 11　测定废水中总氰与硫化物的装置流程图

Figure 11　Flow chart of device for determination of total cyanide and sulfide in wastewater.

此外，用水气蒸馏收集再用离子色谱分析低分子胺、氨[47]和二氧化硫[48]，而采用吹扫捕集法也可以采集氨和烷基胺[49]用离子色谱分析。图 12 为吹扫捕集系统示意图。



NPG—N_2 压力计；FRG—流量计；NP—N_2 纯化装置；RB—温度可控的循环水溶；AS—分析样品；PV—吹扫容器；TV—捕集容器

图 12　氨采集的吹扫-捕集预处理系统示意图

Figure 12　Schematic diagram of purge and trap pretreatment system for ammonia collection.

液态样品中的气体物质也可以采用在线膜蒸馏方式处理和采集，并可以跟离子色谱系统在线联用，该方法可以用于体液（血液、尿液）中的痕量氟离子测定[50]。图 13 为在线膜蒸馏-离子色谱系统。

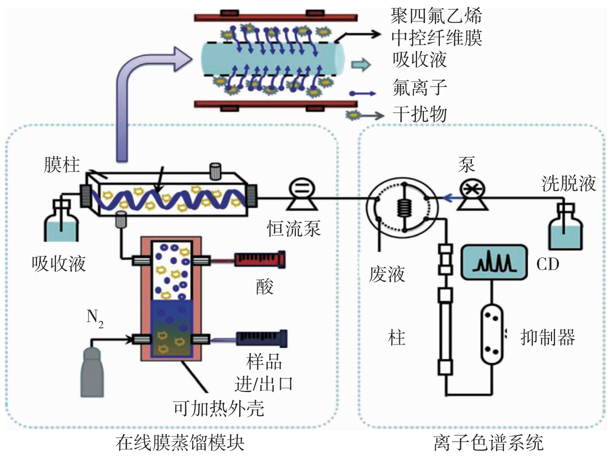


图 13　在线膜蒸馏（MBD）-离子色谱（IC）系统

Figure 13　Online membrane-based distillation (MBD)-ion chromatography (IC) system.

4 气态组分的离子色谱目前存在问题

气体组分的离子色谱采集和分析方法，不论是气体、气溶胶还是液体样品，虽然已经有许多不同类型的技术，但目前均还存在一些问题，使离子色谱技术还不能在气态组分分析中广泛推广，具体表现为：

1）离子色谱针对气态物质的分析，主要对象还是以环境样品为主，少量是食品、化工、材料等，针对生物医药领域样品相对较少。其主要原因表现在目前的离子色谱气态组分还需要大量样品量，针对生物医药领域一般样品量有限，所以需要开发针对微量样品的气态物质的离子色谱分析方法。

2）已经采用离子色谱气态物质的分析，特别是气体组成的预处理和采集技术，相对而言均为较为传统的技术，如固相微萃取、中空纤维膜萃取等技术均还没有应用于离子色谱气态物质分析的样品制备和气态组分的采集，所以如果将这些新出现的样品制备技术并应用于离子色谱分析，可望在离子色谱分析领域得以突破。

3）近年来出现新材料如纳米材料、离子液体，均还没有在离子色谱气态物质分析中的预处理和采集中得以应用，而近来年新材料已经在溶液分析中取得十分巨大的成功，也可望针对气体组份的预处理、采集、浓缩有所进展，也将是今后潜在新方法。

5 气态组分的离子色谱发展前景

我们可预见离子色谱-气态分析，可望在如下几个方面有更大的应用前景：

1）生物呼出气体均为生物体代谢的最终产物，一般均为小分子化合物。除了挥发性有机化合物可以用 GC-MS 分析外，许多可水溶并可电离的物质，采用离子色谱分析将会是 GC-MS 的最佳补充，可以解决许多以往无法或难以分析的气态组分，也可望为生物医学作出贡献。

2）新技术、新材料用于气体预处理、采集及富集的研究，可望离线、在线应用于离子色谱，最终解决离子色谱可以分析更少量的气体样品、更痕量的气体组分和更广泛的应用。

参考文献

[1] 周悦，周曼菲，沈禹，等. 离子色谱法测定南京市道路灰尘中的四种无机阴离子[J]. 中国无机分析化学，2021，11(2)：9-14.
ZHOU Yue, ZHOU Manfei, SHEN Yu, et al. Determination of four inorganic anions in road dust in Nanjing by ion chromatography[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2021, 11(2): 9-14.

[2] 王树加，周肇秋，吴梁鹏，等. 基于氧弹燃烧-离子色谱法测定生活垃圾可燃组分中氯和硫的含量[J]. 中国无机分析化学，2020，10(3)：9-13.
WANG Shujia, ZHOU Zhaoqiu, WU Liangpeng, et al. Determination of chlorine and sulfur in combustible components of municipal solid waste based on oxygen bomb combustion ion chromatography [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2020, 10(3): 9-13.

[3] 孙焕，孙郑冬，陶玲，等. 离子色谱-伏安极谱法联用同时测量空气中阴阳离子及重金属含量[J]. 中国无机分析化学，2012，2(3)：24-27.
SUN Huan, SUN Zhengdong, TAO Ling, et al. Simultaneous determination of anions and heavy metals in air by ion chromatography voltammetry polarography[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2012, 2(3): 24-27.

[4] 熊金勇，田月，金莉，等. 离子色谱法同时测定工作场所空气中 9 种阴离子[J]. 中国职业医学，2018，45(6)：748-752.
XIONG Jinyong, TIAN Yue, JIN Li, et al. Simultaneous determination of 9 kinds of anion in workplace air by ion chromatography [J]. China Occupational Medicine, 2018, 45(6): 748-752.

[5] 朱富强，李月红，路兴文，等. 离子色谱法同时测定工作场所空气中 8 种酸性物质[J]. 现代预防医学，2016，43(3)：421-423.
ZHU Fuqiang, LI Yuehong, LU Xingwen, et al. Detection of 8 acidic compounds in the air of workplace by ion chromatography[J]. Modern Preventive Medicine, 2016, 43(3): 421-423.

[6] POSSANZINI M, PALO V, DESIDERIO C, et al. Determination of carbon disulphide in air as xanthogenate by ion chromatography and capillary electrophoresis[J]. Chromatographia, 1999, 49: 11-12.

[7] 虞佐嗣，朱岩，刘于. 冷凝法收集测定大气中的阴离子及条件优化[J]. 分析试验室，2021，40(7)：808-813.
YU Zuosi, ZHU Yan, LIU Yu. Determination of anions in air by condensation method and optimization of conditions[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2021, 40(7): 808-813.

[8] 朱富强，李月红，贾会美，等. 离子色谱法测定工作场所空气中六价铬含量[J]. 理化检验（化学分册），2017，53(2)：165-168.
ZHU Fuqiang, LI Yuehong, JIA Huimei, et al. IC

determination of hexavalent chromium in air of working place[J]. PTCA(PART B:CHEM. ANAL.), 2017,53(2):165-168.

[9] 吴梦溪,曾晖,张颖,等. 离子色谱法测定环境空气PM2.5中硫酸根离子浓度不确定度评定[J]. 化学分析计量,2020,29(6):141-145.
WU Mengxi, ZENG Hui, ZHANG Ying, et al. Evaluation of uncertainty in determination of sulfate ion concentration in ambient air PM2.5 by ion chromatography[J]. Chemical Metrology,2020,29(6):141-145.

[10] 吕子健,尹晶,姜延国. 离子色谱法测定PM2.5中无机水溶性离子的不确定度评定[J]. 检验检疫学刊,2019,29(5):74-75.
LYU Zijian, YIN Jing, JIANG Yanguo. Evaluation of uncertainty in determination of inorganic water soluble ions in PM2.5 by ion chromatography[J]. Journal of Inspection and Quarantine,2019,29(5):74-75.

[11] 康爱军,秦彩明,陈杵序. 离子色谱法同时测定作业场所空气中的丙酸和氯乙酸[J]. 中国卫生检验杂志,2015,25(20):3442-3444.
KANG Aijun, QIN Caiming, CHEN Chuxu. Simultaneous determination of propionic acid and chloroacetic acid in the air of workplace by ion chromatography[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2015,25(20):3442-3444.

[12] 赵刚. 离子色谱法测定环境空气和废气中氮氧化物含量[C]//中国环境科学学会. 2020中国环境科学学会科学技术年会论文集:第三卷. 南京:中国环境科学学会,2020.
ZHAO Gang. Determination of nitrogen oxides in ambient air and waste gas by ion chromatography[C]//Chinese Society of Environmental Sciences. Proceedings of Science and Technology Annual Meeting of Chinese Society of Environmental Sciences in 2020: Volume 3. Nanjing: Chinese Society of Environmental Sciences, 2020.

[13] 文立超. 色谱法测定环境空气中甲醛含量的实验分析[J]. 科技与创新,2016(6):101,105.
WEN Lichao. Experimental analysis on determination of formaldehyde content in ambient air by chromatography[J]. Science and Technology & Innovation,2016(6):101,105.

[14] AMATI B, DIPALO V, POSSANZINI M. Simultaneous determination of inorganic and organic acids in air by use of annular denuders and ion chromatography[J]. Chromatographia,1999,50(3/4):150-154.

[15] CHENG Peng, CHENG Yafang, LU Keding, et al. An online monitoring system for atmospheric nitrous acid (HONO) based on stripping coil and ion chromatography[J]. Journal of Environmental Science, 2013,25(5):895-907.

[16] KOMAZAKI Y, HAMADA Y, HASHIMOTO S, et al. Development of an automated, simultaneous and continuous measurement system by using a diffusion scrubber coupled to ion chromatography for monitoring trace acidic and basic gases(HCl, HNO_3, SO_2 and NH_3) in the atmosphere[J]. Analyst,1999,124:1151-1157.

[17] 郭方遒,黄兰芳,梁逸曾. 丙烯中微量硫的测定[J]. 分析科学学报,2003,19(4):363-366.
GUO Fangqiu, HUANG Lanfang, LIANG Yizeng. Determination of trace sulfur in propylene[J]. Journal of Analytical Science,2003,19(4):363-366.

[18] 侯晋,窦怀智,张晓冬,等. 离子色谱法测定进口天然气中的氟和氯[J]. 化工时刊,2014,28(12):18-20.
HOU Jin, DOU Huaizhi, ZHANG Xiaodong, et al. Determination of fluorine and chlorine in imported natural gas by ion chromatography[J]. Journal of Chemical Industry,2014,28(12):18-20.

[19] 龙素群,钟志京,林涛,等. 微波消解-离子色谱法测定空气态污染物中硫酸雾[J]. 化学研究与应用,2009,21(9):1304-1308.
LONG Suqun, ZHONG Zhijing, LIN Tao, et al. Determination of sulfuric acid mist in air gaseous pollutants by microwave digestion ion chromatography[J]. Chemical Research and Application,2009,21(9):1304-1308.

[20] 荆海燕. 碳酸盐体系离子色谱法在博物馆酸性气体检测中的应用[J]. 中央民族大学学报(自然科学版),2019,28(3):28-31.
JING Haiyan. Application of carbonate system ion chromatography in acid gas detection in museums[J]. Journal of the Central University for Nationalities (Natural Science Edition),2019,28(3):28-31.

[21] 荆海燕. 被动采样-离子色谱法检测博物馆环境中的酸性气体[J]. 分析试验室,2019,38(6):718-722.
JING Haiyan. Determination of acid gas in museum environment by passive sampling ion chromatography[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory,2019,38(6):718-722.

[22] 陈秀娟,谭红,洪涛,等. Filter badge SO_2捕集-离子色谱法测定空气中二氧化硫[J]. 中国环境监测,2009,25(5):45-46.
CHEN Xiujuan, TAN Hong, HONG Tao, et al. Filter badge, determination of sulfur dioxide in air by SO_2 capture ion chromatography[J]. China Environmental Monitoring,2009,25(5):45-46.

[23] 唐静、赵晟、闫海涛，等. 离子色谱法在文物保护中的应用[J]. 化学分析计量，2017，26(4)：118-122.
TANG Jing, ZHAO Sheng, YAN Haitao, et al. Application of ion chromatography in cultural relics protection[J]. Chemical Analysis and Metrology，2017，26(4)：118-122.

[24] 王真，姜振邦，李仁勇. 离子色谱法测定空气中的氨、肼和乙醇胺[J]. 色谱，2016，34(10)：972-975.
WANG Zhen, JIANG Zhenbang, LI Renyong. Determination of ammonia，hydrazine and ethanolamine in air by ion chromatography[J]. Chromatography，2016，34(10)：972-975.

[25] DAWSON M L, PERRAND V, GOMEZ A, et al. Measurement of gas-phase ammonia and amines in air by collection onto an ion exchange resin and analysis by ion chromatography [J]. Atmospheric Measurement Techniques，2014，7(7)：1573-1602.

[26] CHANG H Y，LEE C G，LEE D S. Development of an automated method for simultaneous determination of low molecular weight aliphatic amines and ammonia in ambient air by diffusion scrubber coupled to ion chromatography [J]. Analytic chemistry, 2003, 75: 6141-6146.

[27] PRAPLAN A P, BIANCHI F, DOMMEN J, et al. Dimethylamine and ammonia measurements with ion chromatography during the CLOUD4 campaign [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2012, 5 (2): 2161-2167.

[28] 闫松，申开莲. 大气中芳香胺及吡啶类化合物的离子色谱法测定[J]. 中国环境监测，2003，19(2)：32-34.
YAN Song，SHEN Kailian. Determination of aromatic amines and pyridines in air by ion chromatography[J]. China Environmental Monitoring，2003，19(2)：32-34.

[29] CHANG I H，LEE D S，LEE Y K，et al. Measurement of atmospheric ammonia by diffusion scrubber-ion chromatography[J]. Analtical Sciences，1997，13(S1)：267-272.

[30] POSSANZINI M, PALO VD, DESIDERIO C, et al. Determination of carbon disulphide in air as xanthogenate by ion chromatography and capillary electrophoresis[J]. Chromatographia，1999，49(11/12)：678-680.

[31] 李栩婕，施晓雯，马嫣，等. 南京北郊四季 PM2.5 中有机胺的污染特征及来源解析[J]. 环境科学，2020，41(2)：537-553.
LI Xujie，SHI Xiaowen，MA Yan，et al. Four seasons in northern suburb of Nanjing[J]. Environmental Science，2020，41(2)：537-553.

[32] 金小玲，方敏，季海冰，等. 离子色谱法应用于杭州大气有机酸湿沉降迁移研究[J]. 环境化学，2020，39(8)：2287-2295.
JIN Xiaoling，FANG Min，JI Haibing，et al. Application of ion chromatography in the study of atmospheric organic acid wet deposition and migration in Hangzhou[J]. Environmental Chemistry，2020，39(8)：2287-2295.

[33] KUMAR P，PRATAP V，KUMAR A，et al. Assessment of atmospheric aerosols over varanasi：Physical，optical and chemical properties and meteorological implications[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics，2020：105424.

[34] 魏一欣. 离子色谱法测定燃煤氟中毒区空气可吸入颗粒物中过滤金属的研究[J]. 中国卫生检测杂志，1993，3(1)：7-9.
WEI Yixin. Determination of filter metals in inhalable particulate matter in coal-burning fluorosis area by ion chromatography[J]. Chinese Journal of Health Inspection，1993，3(1)：7-9.

[35] AMY P S, KATHERINE B B, CHRISTIAN M C, et al. A quantitative method to measure and speciate amines in ambient aerosol samples[J]. Atmosphere，2020，11(8)，808.

[36] ČAPKA L，MIKUŠKA P，KŘŮMAL K. Determination of dicarboxylic acids in atmospheric aerosols using continuous aerosol sampler with on-line connected ion chromatography system [J]. Atmospheric Environment，2020，222：117-178.

[37] YAO X H, SHAIRSINGH K, LAM P H, et al. Underestimation of sulfate concentration of PM2.5 using a semi-continuous particle instrument based on ion chromatography [J]. Journal of Environmental Monitoring，2009(11)：1292-1297.

[38] ZELLWEGER C, AMMANN M, HOFER P, et al. NO_y speciation with a combined wet effluent diffusion denuder-aerosol collector coupled to ion chromatography [J]. Atmospheric Environment，1999(33)：1131-1140.

[39] 杨建虎，王良，李启杰，等. 热转化法测定颗粒物中硝酸盐的研究[J]. 分析仪器，2017(5)，119-122.
YANG Jianhu, WANG Liang, LI Qijie, et al. Determination of nitrate in particulate matter by thermal conversion method [J]. Analytical Instrumentation，2017(5)：119-122.

[40] DESTANOGLU O, YILMAZ G G. Determination of cyanide, thiocyanate, cyanate, hexavalent chromium, and metal cyanide complexes in various mixtures by ion chromatography with conductivity detection[J]. Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies，2016，39(9)：465-474.

[41] DESTANOGLU O，YILMAZ G G，APAK R. Selective determination of free cyanide in environmental water matrices by ion chromatography with suppressed conductivity detection[J]. Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies，2015，(38)：1537-1545.

[42] JASZCZAK E，RUMNA M，NARKOWICZ S，et al. Development of an analytical protocol for determination of cyanide in human biological samples based on application of ion chromatography with pulsed amperometric detection[J]. Journal of Analytical Methods in Chemistry，2017：7157953

[43] XIONG Y，WANG Q，LI X，et al. Total sulfur dioxide determination in red wine by suppressed ion chromatography with in-sample oxidation and SPE[J]. Chromatographia，2018，81：1003-1011.

[44] KADNAR R. Determination of amines used in the oil and gas industry(upstream section)by ion chromatography[J]. Journal of Chromatography A，1999，850：289-295.

[45] 陆克平. 紫外光解/气膜扩散-离子色谱法测定废水中总氰和硫化物[J]. 色谱，2015，33(3)：298-303.
LU Keping. Determination of total cyanide and sulfide in wastewater by UV photolysis/gas film diffusion ion chromatography[J]. Chromatography，2015，33(3)：298-303.

[46] JUN-ICHIRO，ODA，YOSHIAKI，et al. Simultaneous determination of inorganic nitrogen species in seawater by ion chromatography — Utilization of gas-diffusion/o-phthalaldehyde method for fluorometric determination of ammonium ion[J]. Bunseki Kagaku，2019，68(3)：189-193.

[47] FERREIRA F N，AFONSO J C，PONTES F V M，et al. Determination of low-molecular-weight amines and ammonium in saline waters by ion chromatography after their extraction by steam distillation[J]. Journal Separation Science，2016，39：1454-1460.

[47] ZHONG Z X，LI G K，ZHU B H，et al. A rapid distillation method coupled with ion chromatography for the determination of total sulphur dioxide in foods[J]. Food Chemistry，2012，131：1044-1050.

[49] ZHONG Z X，LI G K，LUO Z B，et al. Multi-channel purge and trap system coupled with ion chromatography for the determination of alkyamines in cosmetics[J]. Analytica Chimica Acta，2012，715：49-56.

[50] LOU C Y，GUO D D，WANG N N，et al. Detection of trace fluoride in serum and urine by online membrane-based distillation coupled with ion chromatography[J]. Journal of Chromatography A，2017，1500：145-152.