**DOI**:10.19789/j.1004-9398.2022.01.015
**文献引用**:李秋萱,刘玲花,王学东,等.地下水中挥发性有机物的样品预处理与分析检测综述[J].首都师范大学学报(自然科学版),2022,43(1):91-96. LI Q X, LIU L H, WANG X D, et al. Sample pretreatment and analysis detection of volatile organic compounds in groundwater[J]. Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition),2022,43(1):91-96.

# 地下水中挥发性有机物的样品预处理与分析检测综述*

李秋萱[1,2],刘玲花[2**],王学东[1],张梦雨[2]

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048;
2. 中国水利水电科学研究院,北京 100038)

**摘要**:为了分析和评价地下水中挥发性有机物样品前处理技术及检测方法的优缺点,本文总结近10年相关实验文献,对不同方法的特点和优势进行了分析.结果表明,吹扫捕集法和顶空固相微萃取法是测定挥发性有机物最常用的前处理方法,且具有较高的回收率;质谱检测器的灵敏度高于其他检测器,是检测范围广、灵敏度高的检测器.气相色谱法与气相色谱质谱法是目前较成熟的检测方法,已被广泛应用于水体中挥发性有机物的检测.

**关键词**:挥发性有机化合物;地下水;样品前处理;检测方法
**中图分类号**:X523

# Sample pretreatment and analysis detection of volatile organic compounds in groundwater*

LI Qiuxuan[1,2], LIU Linghua[2**], WANG Xuedong[1], ZHANG Mengyu[2]

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038)

**Abstract**: To analyze and evaluate the advantages and disadvantages of the pretreatment technology and detection methods of volatile organic compounds in groundwater samples, this article summarizes the relevant experimental literature in the past 10 years and analyzes the characteristics and advantages of different methods. The results show that the purge and trap method and the headspace solid phase microextraction method are the most commonly used pretreatment methods for the determination of volatile organic compounds, and have a high recovery rate; the sensitivity of the mass detector is higher than that of other detectors, and it is the detection range wide and high sensitivity detector. Gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometry are currently more mature detection methods, which have been widely used in the detection of volatile organic compounds in water.

**Keywords**: volatile organic compounds; groundwater; sample pretreatment; detection method
**CLC**: X523

收稿日期:2020-11-11
* 科技部科技基础资源调查专项(2017FY100406);中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项(WE0145B062017)
** 通信作者:lhliu @iwhr. com

## 0 引 言

挥发性有机化合物(volatile organic compounds,VOCs)是指一类化学性质活泼、具有挥发性的有机物,世界各国对VOCs指标的控制和定义各有不同,目前还没有统一的定义和界定标准.我国的国家标准和地方标准对VOCs也没有统一的定义,对应的检测方法和控制指标也因检测目标而不同[1-5].环境中常见的VOCs有烷烃、炔烃、烯烃、芳香烃以及各种卤代烃、含氧烃和低沸点多环芳烃等[6].

水环境中VOCs的含量受自然和人为因素影响[7],其稳定性受浓度、毒理学变化和生物降解等因素影响[8].地下水是我国北方大部分地区的重要供水源,地下水中的VOCs浓度一般较低,属于痕量有机污染物.VOCs在前处理及分析过程中,极易受到不同因素的影响,为了更好地检测VOCs含量,明确VOCs在水环境中的迁移转化行为,确保地下水饮水安全,进而对具有相对较大潜在风险的有机污染物进行重点监测并有效治理,因此,选择适当的方法进行准确检测尤为重要.

基于此,本文整理了近10年来有关环境有机分析测试技术应用研究文献,从地下水VOCs样品的采集与储存、前处理及检测仪器进行综述,以此为地下水VOCs的检测、评价和治理提供参考.

## 1 样品的采集与储存

样品采集是水环境监测的关键步骤之一,准确地采集样品,能确保样品的代表性和水质状况的真实性.结合《地下水污染地质调查评价规范》(DD2008-01)[9]及《地块土壤和地下水中挥发性有机物采样技术导则》(HJ1019-2019)[10]等相关规范,采集地下水样品的步骤一般包括:(1)冲洗净水井;(2)将水样沿瓶壁缓慢注入40 mL棕色玻璃瓶中,直至水样凹液面与瓶口对齐;(3)取滴管迅速向瓶中加入1~2滴浓盐酸,调节水样的pH≤2;(4)立即用垫有聚四氟乙烯内衬的螺旋盖密封;(5)倒转样品瓶,观察是否存在气泡,若有气泡,则需重新采集样品;(6)样品放入4 ℃的冰箱内保存,运输中需用冰块维持储存温度为4 °C.注:每批样品需现场采集空白样品1份,同一点位采集样品2份;样品采集后在7 d内完成分析,否则需要重新采集样品.

## 2 样品前处理

VOCs在水中的含量一般比较低、易挥发,导致定量分析比较困难[3].需要通过全程序空白、加标回收、分析质量控制样品等措施对检测分析过程进行质量保证和质量控制.目前,VOCs常用的前处理技术包括:直接进样(direct aqueous injection,DAI)、顶空(head-space,HS)、吹扫捕集(purge and capture technique,P&T)、液液萃取(liquid-liquid extraction,LLE)、液相微萃取(liquid-phase microextraction,LPME)、固相萃取(solid-phase extraction,SPE)、搅拌棒吸附萃取(stir-bar sorptive extraction,SBSE)和固相微萃取(solid-phase microextraction,SPME)等方法.以下围绕几种常用方法展开总结.

### 2.1 DAI法

DAI法是指样品分析前不进行处理或仅过滤后,用进样针抽取一定体积的液体,进样分析[3].该方法适用于检测指标较少、杂质少、目标分析物的含量高于仪器检测下限的水样品,多用于标准样品的检测.因对样品的要求过高,所以应用较少.赵岚等[11]、陈界江等[12]和麦永乐[13]利用DAI法分别前处理了黑龙江流域水、地表水及河水等水样品.

### 2.2 HS法

与DAI法不同,HS法可专一性收集样品中的易挥发性和半挥发性成分,进气体样分析.HS法分为静态HS法和动态HS法(也称P&T法),且常与其他样品前处理技术联用,如HS-LPME、HS-SPME法等(该部分内容将在下文分别展开).静态HS法包括顶空气体直接进样法和捕集阱顶空法[14],前者的常规操作步骤是采用气体进样,无需进行有机溶剂萃取等操作,多用于饮用水中VOCs的分析测定;后者的捕集阱在快速升温的过程中可以实现瞬间进样[15],富集样品中几乎所有的挥发性组分,显著提高进样浓度和方法灵敏度,降低检出限.张忠和刘俊芳[16]、贾亮亮[17]、刘茜和余翀天[18]采用了静态HS法分别对地下水、油田水、污水和生活饮用水等水样品中的挥发性苯系物和卤代烃等有机物进行了前处理.

与LLE和SPE法相比,HS法可避免其他复杂基质成分被带入到分析仪器系统中的可能,不会对挥发性组分分析造成干扰[19].HS在萃取过程中无需有机溶剂[14],减少了实验过程中环境受到二次污染的概率.由于HS分析法具有环保、简便和程序多

样化等优点,因此成为了VOCs分析方法中最有前景的一种前处理方法[14],但对于挥发性较小和灵敏度较低的化合物不适用.

### 2.3 P&T法

P&T法适用于萃取沸点<200 ℃,溶解度<2%的VOCs或半挥发性有机物(semi-volatile organic compounds,SVOC)[20-21],其常规操作步骤是用氦气将水样品中的挥发性成分"吹扫"出来,根据待分析有机物的性质,选择合适的吸附剂,吸附吹扫物,再经热解吸,利用气相色谱(gas chromatography,GC)分析样品.武法伟等[22]、宋洲等[23]和郑磊等[24]利用P&T法对不同水样品进行前处理,分别进行了济南市地表水和地下水、北京市饮用水等水样品中54、29和54种VOCs的前处理.

P&T法具有操作步骤少、检出下限低、灵敏度高、易自动化和同时测定多种VOCs等优点,但随着检测物质种类越多,其分析耗时也会越长,且P&T需要配备相应的装置,无法用于在线监测,只适用于实验室检测.

### 2.4 LPME法

LPME是在LLE基础上提出的,与传统LLE技术相比,其操作简单、消耗溶剂少、富集倍数高、灵敏度高和萃取效率高[3],是一项相对环保的样品前处理新技术.LPME的萃取模式主要包括:(1)以进样针头或Teflon棒为载体的悬滴LPME,分为直接侵入式和HS式,前者适合萃取基质较为简单的水样,后者适合萃取水样中的挥发性和半挥发性的有机物;(2)以多孔中空纤维为载体的LPME(hollow fiber membrane-LPME,HF-LPME),分为二相和三相萃取模式,其萃取过程在中空纤维腔中进行,不与样品直接接触,避免了溶剂损失和交叉污染等问题;(3)基于萃取剂在分散剂作用下形成的多个超微小的分散液滴的分散液液微萃取(dispersive-LPME,D-LPME),具有相对简单、快速的优点;(4)基于室温离子液体(room temperature ionic liquids,RTILs)为萃取剂的RTILs-LPME,其可应用于上述3种模式中,是一种快速、精确、灵敏度高和环境友好的样品前处理技术[25].

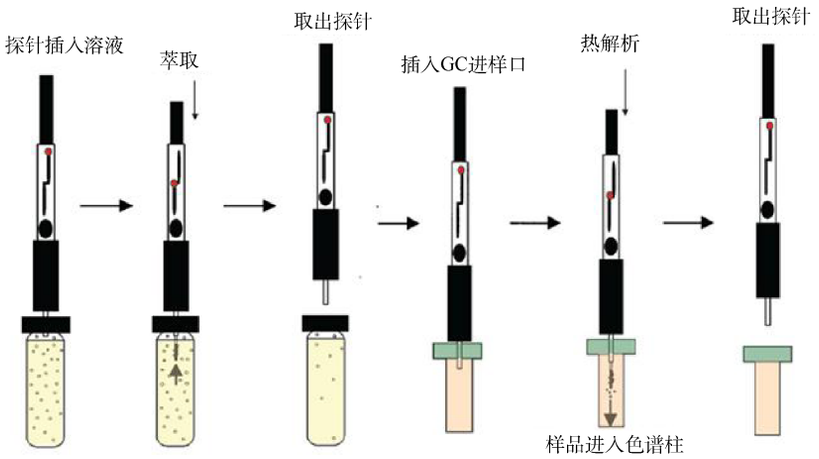
Goh等[26]采用聚丙烯膜袋(MBA)-LPME法,以正辛醇和表面活性剂十二烷基硫酸钠混合溶液作萃取剂,对水样中的糖皮质激素进行了富集处理;毛如虎和相文杰[27]采用直接侵入式LPME技术进行了江水、自来水和农田水等样品中有关速灭威检测的前处理;周建刚和陈红兵[28]应用HS-LPME建立了水体中六氯苯的样品前处理技术;Chanatda[29]等采用改良后的HF-LPME进行了曼谷饮用水、自来水、游泳池水样品中三卤甲烷的样品前处理;周建科等[30]采用1-丁基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐离子液体作为萃取剂,采用HS-LPME方法进行了水中的苯系物的样品前处理.

LPME法可以与不同的载体组合实现样品前处理,其萃取模式相对较多,在选择前处理方法时,可以根据需要检测水样的具体情况、目标有机物特性、实验经费和时间要求等选择合适的前处理方法.

### 2.5 SPME法

SPME是在SPE的基础上发展而来,由Belardi和Pawliszyn[31]于1989年提出,用于样品的采样、萃取、浓缩和进样.操作中不用或少用溶剂,操作简便,易与其他分析仪器或技术联用,克服了LLE等常规方法存在的技术缺陷,如:操作步骤多、耗时长、需使用大量溶剂和消耗大量样品等问题[32-34].SPME萃取的关键在于石英纤维的萃取涂层,依赖涂层性质的不同选择性地实现不同目标分析物的浓缩.SPME分为侵入式和HS式2种,侵入式是将萃取头直接插入液体样品中,常规操作流程如图1所示[35];HS式是将萃取头置于样品上方实现萃取,适于气态或固态样品[36-37].SPME的应用主要涉及2个方面,一方面是高选择性的富集某种或某类成分,另一方面是广泛地浓缩各种不同类型的分析对象[33].在环境样品分析中,SPME可用于水、土壤和大气样品,具有较为广泛的适应性[31].郭景海和李锡清[38]、余明月等[39]采用HS-SPME的前处理方法分别对地下水中的硝基苯和自来水中非目标有机物进行前处理;Wang等[40]以石墨烯为涂层,采用侵入式SPME方法,进行了水样品中16种多环芳烃(PAHs)的前处理.

环境监测要求和目标不同,选择的前处理方法不同,只有通过优化改进出效率更高、物种选择性更全面、操作方法更智能便捷的前处理技术,才能进一步提升实验室色谱分析方法的检出限、精密度等指标[7].总的来说,以上详细介绍的前处理方法,在操作过程中均极少或不使用有机溶剂,降低了实验过程中二次污染的可能性.当检测有机物数量较少、检测的水样较为清澈且水样中有机物含量较高时,可选取直接进样法较为便捷,但同时也需使用去活保护柱;当水样数量较多,且待测




注:GC为气相色谱.

**图1 固相微萃取常规操作流程[35]**

有机物指标较多时,可选择P&T法,但随着样品的增多所消耗的前处理时间也会相应增多;当样品较为复杂、待测物含量降低且时间紧迫时,可选择SPME法.

## 3 检测方法

地下水中VOCs的检测方法主要有:毛细管电泳(capillary electrophoresis,CE)、紫外可见光分光光度(ultraviolet and visible spectrophotometry,UV),GC、高效液相色谱(high performance liquid chromatography,HPLC)、质谱(mass spectrum,MS)、气相色谱质谱联用(GC-MS)和高效液相色谱质谱联用(HPLC-MS)等.检测地下水中的VOCs时,较为常用的检测方法是GC和GC-MS法.

### 3.1 GC

GC是利用物质的沸点、极性及吸附性质的差异来实现混合物的分离检测[41].适用于VOCs检测的检测器主要有电子捕获检测器(electron capture detector,ECD)和火焰离子检测器(flame ionization detector,FID).ECD对卤代有机物具有高度特异性,适用于卤代烃类挥发性有机物的测定[42];FID多用于测定水中挥发性芳烃类化合物[43].毕兴[41]利用ECD-GC和FID-GC分别分析了水体中的卤代烃、氯酚类和苯系物;刘茜和余翀天[18]利用ECD-GC测定了环境水中的24种卤代烃;郭景海和李锡清[38]结合HS-SPME方法,利用FID-GC测定了地下水中硝基苯;郭琴等[44]采用P&T法,利用FID-GC建立了同时分析芳烃及其衍生物和卤代烷烃化合物的分析方法.

### 3.2 GC-MS

GC-MS的主要原理是将分离能力强的色谱柱与定性定量能力强的MS相结合,兼具了二者的优势,不仅实现了在线联用,而且相互取长补短,使分析功能更快、更有效[45].与GC相比,GC-MS具有检出限低、灵敏度高、定性和定量更准确等优势,在测定水中VOCs时,分离能力、定性能力及回收率更佳[46],现已广泛应用于水环境监测领域.

GC-MS可进行全扫描(SCAN)方式进行定性,再采用提取特征离子(SIM)的方式进行定量,也可采用多通道、多离子与单离子提取扫描结合的方式,以达到最高检测灵敏度[43].分析不同目标物时,GC-MS的最佳使用条件不同,如:程序升温条件、吹扫时间、色谱柱选择和离子扫描范围等,需要先进行测量条件优化.目前,P&T-GC-MS法是地下水检测VOCs中最常使用的方法,如:普学伟等[47]、张艳勤[48]、张子豪等[49]和许峰等[50]利用P&T-GC-MS方法分别实现了水样品中25、59、101和30种VOCs的检测分析.

## 4 结束语

降低地下水样品在采集过程的损失,探索更简单、更稳妥的样品预处理方法至关重要.目前,地下水中VOCs的前处理首选方法是P&T和HS-SPME,较成熟的检测方法是GC与GC-MS,且前处理方法可与检测方法联合使用.由于VOCs极易挥发,目前发展较多的是基于现场检测的设备及方法,有利于增加数据的准确性.因此,便捷、快速和准确地进行现场环境样品检测,是未来的研究趋势.

## 参 考 文 献


[1] 杨大鹏.吹扫捕集-GC-MS测定水中55种挥发性有机物的方法研究[D].长春:吉林大学,2015.

[2] 李靖,聂磊,邵霞,等.城市挥发性有机物排放源分布情况分析[C]//中国机械工程学会环境保护分会第四届委员会.中国机械工程学会环境保护分会第四届委员会第一次会议论文集.郑州:中国机械工程学会,2008:23-28.

[3] 姜洋,房丽萍,杨刚,等.水体中挥发性有机物分析方法研究进展[J].环境化学,2015,34(9):1611-1618.

[4] 孙玉梅.GC-MS联用技术对地下水中半挥发性有机物监测的方法研究[D].北京:中国地质大学(北京),2006.

[5] 江梅,邹兰,李晓倩,等.我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨[J].环境科学,2015,36(9):3522-3532.

[6] AMIN H,ATKINS P T,RUSSO R S,et al. Effect of bark beetle infestation on secondary organic aerosol precursor emissions [J]. Environmental Science & Technology,2012,46(11):5696-5703.

[7] 张展毅,曾凡进,朱智成,等.国家环境标准中挥发性有机物分析方法的研究进展[J].环境监测管理与技术,2016,28(5):14-18.

[8] CHARY N S,FERNANDEZ-ALBA A R. Determination of volatile organic compounds in drinking and environmental waters [J]. Trends in Analytical Chemistry,2012,32:60-75.

[9] 中国地质调查局.地下水污染地质调查评价规范:DD2008-01[S].北京:中国标准出版社,2008.

[10] 中华人民共和国生态环境部.地块土壤和地下水中挥发性有机物采样技术导则:HJ1019-2019[S].北京:中国标准出版社,2019.

[11] 赵岚,王淼,王晓婧,等.直接进样法-超高效液相色谱串联质谱法测定黑龙江流域水中10种农药残留[J].食品安全质量检测学报,2020,11(6):1772-1778.

[12] 陈界江,邹云,高仪斌,等.UPLC-MS/MS法同时测定地表水中多种有机污染物[J].环境监测管理与技术,2020,32(2):56-59.

[13] 麦永乐.高效液相色谱-串联质谱法直接进样测定水中6种有机物[J].能源与环境,2019(3):64-65+67.

[14] 张茜,刘炜伦,路亚楠,等.顶空气相色谱-质谱联用技术的应用进展[J].色谱,2018,36(10):962-971.

[15] 金钰.捕集阱顶空-气相色谱法测定水中低浓度苯系物[J].分析化学,2008,36(11):1567-1570.

[16] 张忠,刘俊芳.顶空-气相色谱法测定地下水中苯和甲苯的方法研究[J].化工管理,2019(27):45-46.

[17] 贾亮亮.顶空-气相色谱法测定水中7种苯系物[J].化学分析计量,2019,28(6):52-54.

[18] 刘茜,余翀天.顶空-气相色谱法(GC-ECD)测定环境水中的24种卤代烃[J].环境化学,2014,33(9):1621-1622.

[19] 胡璟珂,马健生.地下水中挥发性有机污染物测定研究[J].安徽农业科学,2010,38(1):307-308+323.

[20] 刘莹,孙力平,高士奇.吹扫捕集-GC/MS法检测饮用水中十三种常见挥发性有机物[J].环境工程,2011,29(增刊):242-244.

[21] 费勇,姚恩亲,张海燕,等.吹扫捕集-气相色谱/质谱联用同时测定饮用水源地水中痕量挥发性有机物[J].岩矿测试,2010,29(2):127-130.

[22] 武法伟,袁鹏辉,陈明晓,等.P&T-GC-MS法测定水中54种挥发性有机物[J].环境监控与预警,2017,9(4):26-31.

[23] 宋洲,杨杰,董学林,等.P&T-GC-MS联用技术测定地下水中挥发性有机污染物[J].安全与环境工程,2017,24(1):88-94+99.

[24] 郑磊,周志荣,张淼,等.吹扫捕集-气质联用法快速测定生活饮用水中54种挥发性有机物[J].中国公共卫生,2019,35(4):484-487.

[25] 唐婧.环境水样中有机污染物前处理方法的研究进展[J].四川文理学院学报,2011,21(2):55-57.

[26] GOH S X L,CHONG B H D,LEE H K.Fully automated water sampling-surfactant-enhanced membrane bag liquid-phase microextraction-ultrahigh performance liquid chromatography-mass spectrometry[J]. Analytical Chemistry,2020,92(7):5362-5369.

[27] 毛如虎,相文杰.直接液相微萃取-高效液相色谱法测定水中速灭威残留[J].南京晓庄学院学报,2012,28(3):53-58.

[28] 周建刚,陈红兵.顶空液相微萃取-高效液相色谱法测定水中六氯苯[J].湖北大学学报(自然科学版),2020,42(3):267-271.

[29] CHANATDA W, WALEED A, MANUEL M, et al. Combining graphite with hollow-fiber liquid-phase microextraction for improving the extraction efficiency of relatively polar organic compounds[J]. Talanta,2020,215(6):120902.

[30] 周建科,宋歌,于贝贝,等.离子液体顶空微萃取:气相色谱法测定水中苯系物[J].福建分析测试,2009,18(1):12-15.

[31] BELARDI R P, PAWLISZYN J B. The application of chemically modified fused silica fibers in the extraction of organics from water matrix samples and their rapid transfer to capillary columns[J]. Water Quality Research Journal,1989,24(1):179-191.

[32] 赵丽,师真,梁志坚,等.生活饮用水中半挥发性有机污

染物残留检测[J].湖北农业科学,2019,58(8):129-132.
[33] 王媛.固相微萃取新方法及应用[D].北京:中国科学院大学,2014.
[34] 马继平,王涵文,关亚风.固相微萃取新技术[J].色谱,2002,20(1):16-20.
[35] ULRICH S. Solid-phase microextraction in biomedical analysis[J]. Journal of Chromatography A, 2000, 902(1):167-194.
[36] 孟凡生,王业耀,陈晶.我国水环境有机物分析前处理技术[J].环境监测管理与技术,2010,22(4):15-18.
[37] 饶竹.环境有机污染物检测技术及其应用[J].地质学报,2011,85(11):1948-1962.
[38] 郭景海,李锡清.顶空固相微萃取气相色谱法测定地下水中硝基苯[J].吉林化工学院学报,2011,28(11):91-94.
[39] 余明月,杨小秋,樊蓉,等.顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱联用法用于非目标性筛选饮用水中挥发性有机物[J].分析化学,2020,48(9):1228-1235.
[40] WANG Y,WANG X Y,GUO Z P,et al. Ultrafast coating procedure for graphene on solid-phase microextraction fibers[J]. Talanta,2014,119:517-523.
[41] 毕兴.气相色谱法分析水质中有机污染物的研究[J].环境与发展,2019,31(9):135+137.
[42] 韦方洋,丁银,李艳丽.水质中挥发性有机物在线监测技术研究进展[J].环境与发展,2019,31(5):90+92.
[43] 何芸菁.饮用水中挥发性有机物(VOCs)检测技术的研究进展[J].福建分析测试,2017,26(2):31-35.
[44] 郭琴,丛庆美,张吉芬,等.吹扫捕集气相色谱(FID)内标法测定水中28种挥发性有机物[J].预防医学论坛,2010,16(2):144-148.
[45] 郭燕金.GC-MS原理及在食品添加剂检测中的应用[J].海峡药学,2013,25(7):126-128.
[46] 范慧群.气相与气质联用测定地表水中VOC的方法比较[J].环境保护科学,2013,39(4):108-111.
[47] 普学伟,林奕,李蕾,等.P&T-GC-MS联用技术测定水中的25种挥发性有机物[J].环境科学导刊,2020,39(增刊):101-105.
[48] 张艳勤.吹扫捕集/气相色谱-质谱法测定水中59种挥发性有机物[J].广东化工,2018,45(4):150-152.
[49] 张子豪,余建龙,李春燕,等.吹扫捕集-气相色谱-质谱法同时测定环境水中101种挥发性有机物[J].化学分析计量,2016,25(6):17-21.
[50] 许峰,邵云飞,段立红,等.吹扫捕集/气相色谱/质谱联用测定水中30种挥发性有机物[J].中国给水排水,2017,33(8):132-135.

(责任编辑:王 媛)

(上接第75页)

[13] 李延峰.基于最严格水资源管理的城市节水综合评价及管理对策研究[D].郑州:华北水利水电大学,2016.
[14] 高雄,王红瑞,高媛媛,等.基于迭代修正的水资源利用效率评价模型及其应用[J].水利学报,2013,44(4):478-488.
[15] 靳京,吴绍洪,戴尔阜.农业资源利用效率评价方法及其比较[J].资源科学,2005(1):146-152.
[16] 代兴兰.最严格水资源管理评价的神经网络模型及其应用[J].水资源与水工程学报,2015,26(2):119-125.
[17] CORTES C, VAPNIK V. Support-vector networks[J]. Machine Learning,1995,20(3):273-297.
[18] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965,8(3):338-353.
[19] 刘会文.基于模糊综合评价和BP神经网络的景观河道水质评价研究[D].天津:河北工业大学,2015.
[20] 北京市水务局.北京市水资源公报[R].北京:北京市水文总站,2019.
[21] 刘君龙,陈进,袁喆,等.基于DPSIR-模糊集对评价模型的湖北省水资源评价[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(3):57-64.
[22] 崔东文.支持向量机在湖库营养状态识别中的应用[J].水资源保护,2013,29(4):26-30.
[23] 周志华.机器学习[M].北京:清华大学出版社,2016.
[24] 崔东文.支持向量机在水资源类综合评价中的应用:以全国31个省级行政区水资源合理性配置为例[J].水资源保护,2013,29(5):20-27.

(责任编辑:李拓宇)