

我国地下水污染调查建立全流程 现代化调查取样分析技术体系

孙继朝¹⁾, 刘景涛^{1)*}, 齐继祥¹⁾, 张玉玺¹⁾, 张礼中¹⁾, 刘丹丹¹⁾, 杨明楠¹⁾,
王苏明²⁾, 刘 菲³⁾, 康卫东⁴⁾, 李广贺⁵⁾, 张永涛¹⁾, 刘俊建¹⁾, 荆继红¹⁾

1) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061;

2) 中国地质科学院国家地质实验测试中心, 北京 100037; 3) 中国地质大学(北京), 北京 100083;

4) 西北大学, 陕西西安 710069; 5) 清华大学, 北京 100084

摘 要: 在实施全国首轮地下水污染调查评价过程中, 通过综合攻关和集成创新, 建立了调查、取样、测试与质量控制技术体系。研发了系列取样技术, 攻克敏感性痕量组分采集技术难题, 解决了送样周期问题; 借助遥感技术与卫图解读土地利用与污染源分布信息, 解析历史污染源分布; 集成水土污染快速调查系统, 实现现场快速查明污染现状、识别污染源; 建立了数据库建设与质量保障技术体系; 构建了有机分析测试与质量控制技术平台。提升了我国地下水污染调查技术水平, 先后组织了千余人的技术培训, 培养了一大批创新型地下水污染调查评价技术专业人才。

关键词: 地质科技; 地下水污染; 调查技术; 有机测试; 质量控制

中图分类号: X523; O656 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2015.06.02

Modern Investigation, Sampling and Analysis Technological System in the Investigation of Groundwater Pollution in China

SUN Ji-chao¹⁾, LIU Jing-tao^{1)*}, QI Ji-xiang¹⁾, ZHANG Yu-xi¹⁾, ZHANG Li-zhong¹⁾, LIU Dan-dan¹⁾,
YANG Ming-nan¹⁾, WANG Su-ming²⁾, LIU Fei³⁾, KANG Wei-dong⁴⁾, LI Guang-he⁵⁾,
ZHANG Yong-tao¹⁾, LIU Jun-jian¹⁾, JING Ji-hong¹⁾

1) The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061;

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

3) China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083;

4) Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069; 5) Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract: Through comprehensive research and integrated innovation, the investigation, sampling, testing and quality control system was established during the implementation of the first cycle of groundwater pollution investigation and evaluation program. A series of samplers was developed, so the sample delivery time problem was resolved and the delivery cost was reduced. And the trace components sampling problems was overcome. High resolution remote sensing data were interpreted to identify the land use type and pollution sources. Through the integrated water and soil pollution investigation system, the rapid characterization of the pollution plume and the identification of pollution sources were realized. Groundwater pollution investigation database and quality assurance system were set up. Organic analysis platform and laboratory quality management system were established. Groundwater pollution survey technology of China has been greatly improved. More than a thousand people have been trained. In addition, a large number of innovative professional talents for the groundwater pollution investigation and evaluation work were cultivated.

本文由中国地质调查局地质大调查项目(编号: 1212011121170; 1212011220982; 12120115048001)资助。获中国地质调查局、中国地质科学院 2014 年度地质科技十大进展第五名。

收稿日期: 2015-09-23; 改回日期: 2015-10-20。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 孙继朝, 男, 1956 年生。研究员。主要从事水文地质研究。E-mail: gwswsun@263.net.cn。

*通讯作者: 刘景涛, 男, 1981 年生。副研究员。长期从事地下水环境调查与相关技术方法开发工作。E-mail: sicongzhen@126.com。

Key words: geological science and technology; groundwater pollution; survey technology; organic testing; quality management

地下水是重要的战略水资源,在社会经济发展中发挥着重要作用。在过去的几十年里,受城镇化、工业化进程加快影响,特别是城市及工矿企业“三废”无序排放影响,我国地下水环境质量正在发生重大变化。调查发现地下水正在区域上发生着硬化、盐化、硝化(三氮污染)、酸化等问题,局部重(类)金属污染严重,个别地方有机污染已有显现,且某些有机组分检出率较高(Zhang et al., 2015; 张玉玺等, 2011a, b; 朱亮等, 2014, 2015; 高存荣和王俊桃, 2011)。

为查明我国地下水污染状况,保障饮用水安全,中国地质调查局 2005 年在珠江三角洲地区开展了全国地下水污染调查示范项目(地球学报编辑部, 2010),并陆续推进了全国地下水污染调查项目(文冬光等, 2012)。在推进该项工作过程中,不断克服技术瓶颈,创新调查、取样和测试技术,由中国地质科学院水文地质环境地质研究所牵头,中国地质科学院国家地质实验测试中心、中国地质大学(北京)、西北大学、清华大学等参与,开展了系列技术方法开发集成工作,初步构建了我国地下水污染调查评价技术方法体系,提升了我国地下水污染调查技术水平(中国地质科学院, 2015)。

1 原始性创新研发系列取样技术及配套装置,保障了样品采集质量

取样技术在地下水污染调查工作中占有非常重要的地位。可靠的数据是进行地下水质量评价的基础,样品的采集是获得可靠测试数据的关键环节(郑继天和王建增, 2005)。取样过程需要把样品从地下水系统取入取样容器,其间会受到多种因素干扰(毛志新等, 2006),包括取样设备材质、取样扰动、曝气、负压、顶空、光照、与其它含水层或外界大气接触等对测试组分产生影响,甚至还有样品原有系统的特征等一些不确定因素的影响,有些甚至可直接导致样品失真,得出错误数据,使评价失去客观性。国内外取样技术缺陷集中表现在易挥发组分的损失和交叉污染上(Liu et al., 2013)。

根据我国不同地区地下水埋藏特点、水井结构和取水设备类型,结合测试组分要求,开发了如下取样技术,保障了地下水污染调查取样质量。

1.1 无井软土层地区快速采集地下水样品装置

针对无井地区采集地下水样品效率低下问题,研发了无井软土层地区快速采集地下水样品装置(图 1)和快速成孔装置。可在无地下水露头状况下快速采集软土层地区浅层地下水样品,减少一般成井

过程对地下水样品各种组分含量造成的影响,成孔后钻具可充当井壁,可直接采集样品(刘景涛等, 2010)。

1.2 适用于敞口井的原位取样设备

1.2.1 电控定深原位取样器

由取样器主体(1)、内控卡(8)、自控电路(11)三部分组成(图 2),主要材质为不锈钢,以防止制作材料对样品测试组分的干扰。当取样器下到预定深度时,传感器(10)浮子上浮,给出自控开关一个信号,使微型电源和传感器组成的电路闭合,电磁阀(14)打开;当取样完成时,上提取样器,传感器浮子下沉,信号消失,电磁阀关闭(图 3)。该取样器可以定深原位采集地下水和地表水样品,减少与不同层位水体和外界系统接触时间,降低挥发性组分损失(刘景涛等, 2008)。

1.2.2 原瓶定深采样器

原瓶定深采样器(图 3)可避免水样的二次转移,适于无肉眼可见物的地表水和大口井采样,尤其适于采集挥发性和半挥发性有机物分析样品。所研发的两种原瓶定深采样器适于 50 m 以内深度水体的

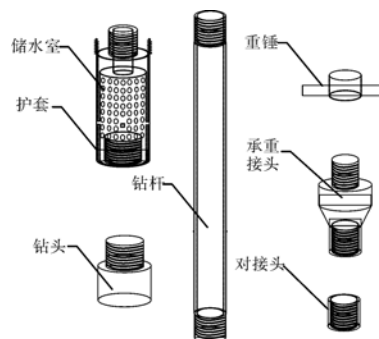


图 1 无井软土层地区快速采集地下水样品装置结构示意图

Fig. 1 Structure of fast groundwater sampler in soft soil area without well

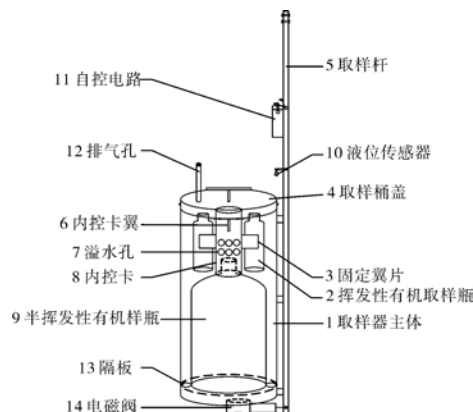


图 2 取样器结构示意图

Fig. 2 Sampler structure

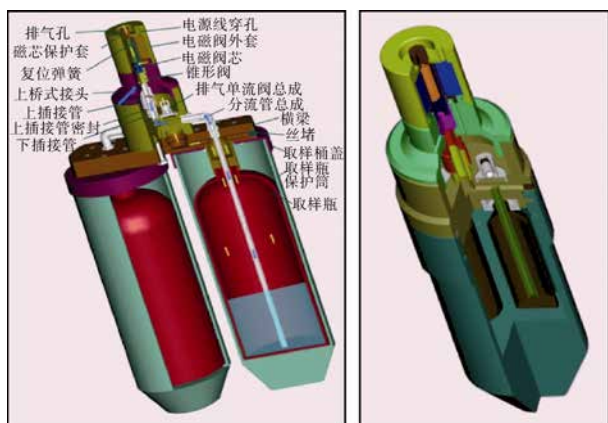


图3 原瓶定深采样器结构示意图

Fig. 3 Structure of original bottle sampler that can set depth



图4 野外萃取装置

Fig. 4 Field extraction device

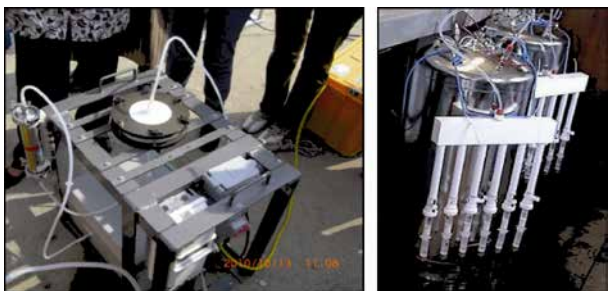


图5 三明治盘式与多通道固相萃取装置

Fig. 5 Sandwich plate and multi-channel solid phase extraction device

定深采样。通过电磁阀打开或关闭进水口。水样自瓶底注入,不产生曝气;注入流速可控,不产生紊流。瓶中气体通过导管排放至水面之上,不对水体产生扰动。

1.3 野外萃取取样技术研发

通过实验和综合研究,分别采用离线(图4)和在线两种形式,实现了萃取小柱在保存半挥发性有机物组分的功能突破,可以分别在 -20°C 、 4°C 和常温 20°C 条件下能稳定保存30 d以上。通过现场离线萃取技术,有效解决了我在西北、西南等偏远地区开展地下水污染调查样品运输、存贮条件苛刻的问题。另外根据不同类型地下水采样富集净化条件,开发了三明治盘式现场富集装置和多通道固相萃取现场富集装置(图5),保障了样品采集质量。

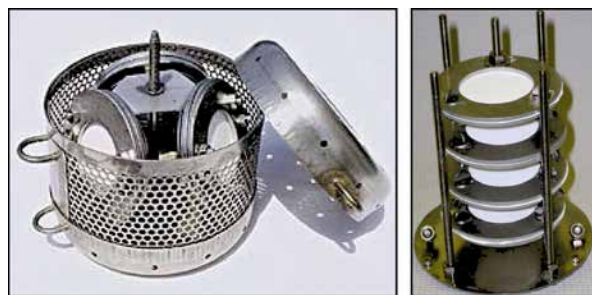


图6 极性有机污染物被动式综合采样装置

Fig. 6 Polar organic chemical integrative samplers

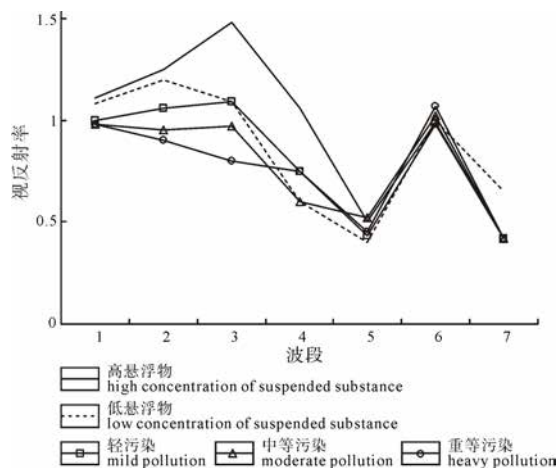


图7 不同污染程度水体的反射波谱差异

Fig. 7 Reflection spectra of varying degrees of pollution water

1.4 极性有机污染物被动式综合采样技术

通过填料优选、洗脱优化和富集动力学研究,开发了极性有机污染物被动式综合采样技术(图6),避免单次采样代表性不好的问题,对于极低浓度的地下水环境,可提供短时采样无法得到的浓度数据,从较长的时间尺度来掌握水质的情况。

2 创新集成调查技术体系,提升野外预判能力

地下水污染调查是一项专项水文地质调查工作,为保障我国首轮地下水污染调查质量,提高野外预判能力,加快成果转化周期,通过自主研发、探索应用和创新集成相结合,形成了先进的调查技术体系,集成了软件支撑系统,搭建了野外操作平台,显著提升了我国地下水污染调查技术水平。

2.1 探索性应用遥感技术解译地表水体污染状况

地表水体及其污染物的光谱特性是利用遥感信息进行水环境监测和评价的依据。不同种类和浓度的污染物使水体在颜色、密度、透明度、温度等方面产生差异,导致水体反射波普能量发生变化(图7),探索了遥感图像在色调、灰阶、纹理等特征上反映的影像信息的差别,从而识别污染源、污染范围、面积、浓度等,快速地获取到地表水系结构

及其历史水质变化状况,结合地下水水质监测数据,进一步综合研究地下水环境响应关系,分析水环境质量变化与城市化、工业化发展,土地利用、地表覆盖变化等人类活动的耦合机制。根据不同地表水体辐射光谱的变化特征完成华北平原 14.6 万 km² 范围内地表水体污染程度分布的遥感解译工作。

2.2 创新集成水土污染快速调查技术系统

通过自主研发、技术引进改造、对比试验与探索性联用,构建了水土污染快速调查硬件系统,搭建了野外操作平台,开发“水土污染快速调查系统”(图 8)和“水土污染快速调查案例数据库”软件(图 9),编制了《水土污染场地快速调查规程》,集成水土污染快速调查技术系统(图 10)。可现场探测地下水水源,查明地下水流速流向、地表水水深和预定深度水温;快速成孔,采集不同深度土壤、地表水样品,不同埋藏条件的地下水样品;现场快速测定岩土中 24 种金属元素含量;原位测试土壤气体 8 项物理化学指标;现场测试水样 44 项物理和无机指标以及水样中挥发性和半挥发性有机组分。通过技术联用实现现场快速刻画污染晕识别污染源。在甘

肃、青海、陕西、河北等典型地段,完成了有机污染、重金属等污染物污染场地的调查,为 2015 年中央办公厅腾格里沙漠污染督查提供了技术支撑。

3 开发系列信息采集与数据库建设软件,建立质量保障技术体系,为地下水污染调查提供了便捷数据查询、汇总和分析技术

数据库建设成果质量是进行全国地下水污染现状分析、地下水水质评价和地下水污染评价的数据基础。为了能够保障地下水污染调查评价数据库建设质量,建立了完善的地下水污染调查评价数据库建设质量保障技术体系,实现了对建库准备阶段、数据库建设阶段、建库成果编制三级建库质量保障和监控(图 11)。

(1)编制了《地下水污染调查评价数据库建设工作指南》,统一了数据库建设技术要求,明确了地下水污染野外调查、测试、评价、综合研究成果等方面的数据库建设内容,数据库建设要求、空间数据库存储要求及建库方法。

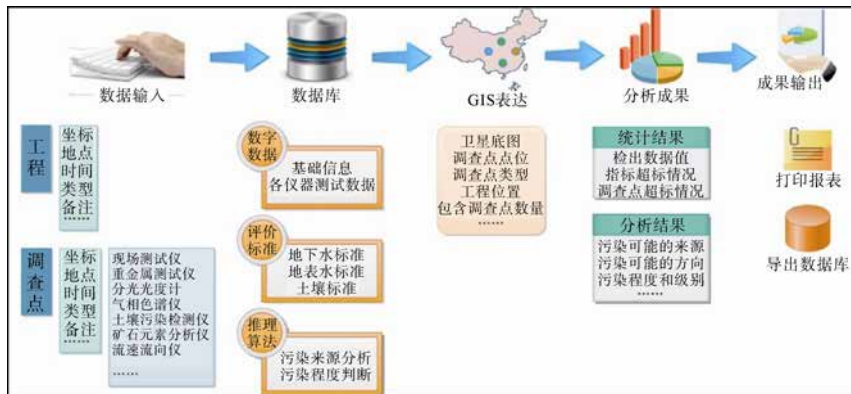


图 8 水土污染快速调查系统软件功能结构图

Fig. 8 Function structure of soil and groundwater pollution emergency investigation system software

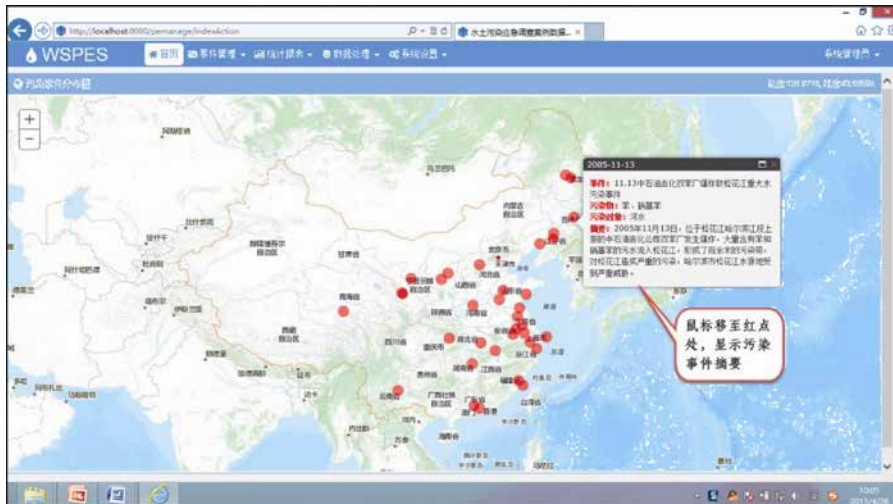


图 9 水土污染快速调查案例数据库登录界面

Fig. 9 The login interface of soil and groundwater pollution emergency investigation case database



图 10 水土污染快速调查技术系统

Fig. 10 Quick survey system of soil and groundwater pollution

(2)研发了地下水污染调查野外数据采集系统、数据录入系统、数据处理与分析系统数据库建设支撑系列软件,实现了地下水污染野外调查、数据整理与汇总、数据分析与评价、数据成果编制等全流程的信息化管理,为地下水污染调查数据库、空间成果数据库建设提供了信息技术支撑。

(3)全面实施数据库建设中期质量检查、数据库成果质量预检查、数据库成果质量验收和数据库成果质量复核的四级数据库建设质量保障体系。基于建库工作日志、自检、互检、抽检制度实施的四级数据库质量保障体系,对原始资料数据库、空间数据库、综合成果、技术文档和元数据库进行了全面的质量检查和监控,保障了地下水污染调查评价数据库成果的质量。

4 构建有机分析实验平台,利用现代网络技术实现了对全国 33 个分析实验室分析流程的远程监控,保证了分析数据质量

4.1 加强测试能力建设,构建有机分析实验平台

通过多次组织地下水有机分析技术培训和学术交流、编制地下水样品有机分析方法作业指导书、指导实验室依据自身仪器设备配置能力优化方法参数、建立适宜的有机分析方法、开展有机分析方法确认和验证、组织实验室间能力验证和比对考核、组织专家多次现场指导、实施有机分析技术能力评

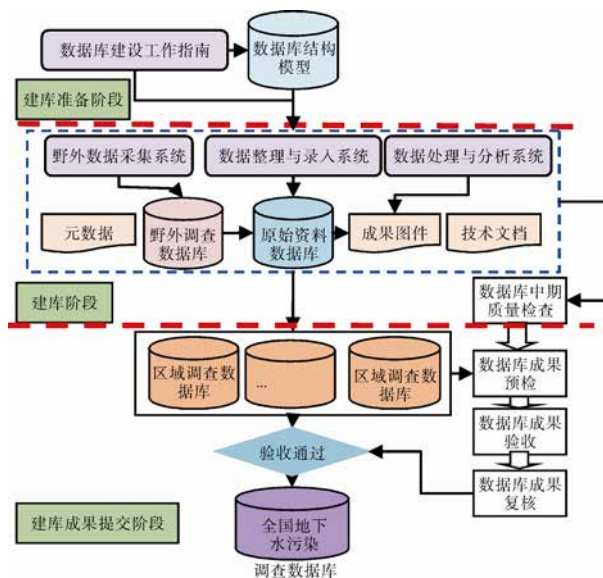


图 11 地下水污染调查数据库建设与质量保障技术体系

Fig. 11 Groundwater pollution investigation database and quality assurance system

价确认和监督检查以及指导仪器设备购置、环境条件改善等多种形式,有效提升了实验室地下水样品有机分析测试技术能力和质量水平,针对 DD2008-01 规定的地下水 88 项有机污染物测试指标建立了配套分析方案,实现了地质实验室从零开始,高起点、高效率跨越式发展,有效形成了有机分析技术能力,有力推动了现代有机分析技术在地质实验室的广泛应用。

建立了承担全国地下水污染调查评价样品实验室的准入机制,实现了地质行业实验室地下水样品有机分析技术能力建设零的突破,构建了地质行业 21 个有机和 36 个无机实验室,满足了全国地下水污染调查评价工作的要求,同时涌现出一批评价样品分析纳入实验室质量管理体系,在 2006—2014 年四年间累计承担完成了 4 万余组样不同层次地下水有机分析专业人才,形成了地下水有机分析测试团队、研究团队和专家团队,有力推动了中国地质系统有机测试的发展。

4.2 率先在国内外实现了地下水样品有机分析质量的远程实时监控

通过系统设计,运用现代质量管理和数理统计理论,依据相关 ISO 国际标准和国家标准,结合地下水分析测试的技术特点,研究建立了地下水分析测试全流程、全方位和全要素的质量控制技术体系(图 12)。

自主研发的“地下水样品测试质量实时监控管理系统”,率先在国内外实现了地下水样品有机分析质量的远程实时监控,应用于对实验室日常测试过程的质量监控和趋势监控分析。已对承担地下

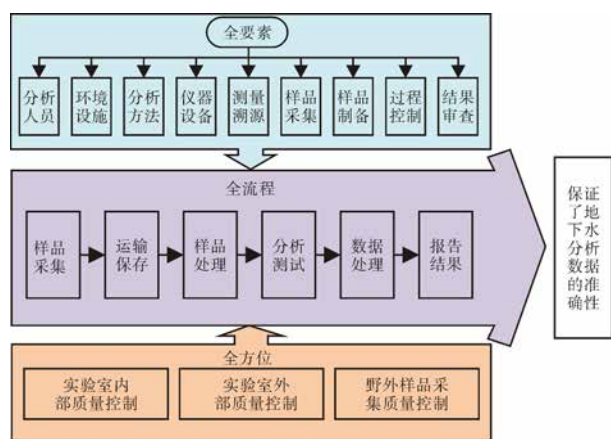


图 12 实验室测试质量控制技术体系

Fig. 12 Laboratory testing quality management system

水有机分析任务实验室提交的 1200 余个质量监控样品的万余个分析数据进行了评价,并对数据进行统计趋势分析和多项评价参数的综合评价,统计结果表明远程实时质量监控数据优秀率达 88.7%,总体合格率达 99%,质量监控工作成效显著。建立了标准化的实验室外部质量监控管理机制,实验室的检测水平呈逐年上升趋势,有机分析测试技术水平显著提高,为全国地下水污染调查评价工作提供了有效的技术支撑。

5 结论

通过综合攻关和集成创新,建立了调查、取样、测试与质量控制技术体系。显著提升了我国地下水污染调查技术水平,先后组织了千余人的技术培训,培养了一大批创新型人才。

(1)原始性创新研发了系列取样技术与配套现场萃取装置,攻克敏感性痕量组分采集技术难题,有效降低了样品采集过程中易挥发组分的损失,减少了交叉污染可能性,解决了送样周期问题,保证了全国地下水污染调查样品采集质量。

(2)借助遥感与卫星图解读土地利用与污染源分布和变迁信息,探索了遥感图像在色调、灰阶、纹理等特征上反映的影像信息的差别,从而识别不同时期污染源、污染范围、面积、浓度等,为研究水环境质量变化与人类活动耦合关系提供了科学依据。

(3)通过自主研发、引进吸收、对比试验、技术联用、平台搭建、综合集成,构建了水土污染快速调查系统,实现现场快速查明污染现状、刻画污染晕、解析污染趋势、识别污染源。可现场探测地下水水源和排污管线分布;查明地下水流速流向、地表水水深和预定深度水温;快速成孔,采集不同深度土壤、地表水样品,不同埋藏条件的地下水样品;现场快速测定岩土中 24 种金属元素含量;原位测

试土壤气体 8 项物理化学指标;现场测试水样 44 项物理和无机指标以及水样中挥发性和半挥发性有机组分。在近百个水土污染场地展开调查,取得良好调查效果,为有关部门地下水污染督查提供技术支撑。

(4)开发系列信息采集与数据库建设软件,建立质量保障技术体系,为地下水污染调查提供了便捷数据查询、汇总和分析技术支撑。

(5)强化测试能力建设,实现地质行业有机测试能力零突破,构建了由 21 个有机分析实验室组成的分析平台,建立了质量控制技术体系,率先在国内外实现了地下水样品有机分析质量的远程实时监控。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. 1212011121170, 1212011220982 and 12120115048001).

参考文献:

- 地球学报编辑部. 2010. 我国首次完成区域性地下水污染调查评价成果[J]. 地球学报, 31(1): 42-42.
- 高存荣, 王俊桃. 2011. 我国 69 个城市地下水有机污染特征研究[J]. 地球学报, 32(5): 581-591.
- 刘景涛, 孙继朝, 王金翠, 黄冠星, 向小平, 荆继红, 陈玺, 张玉玺. 2008. 浅层地下水定深取样器的研制[J]. 环境监测管理, 20(5): 56-58.
- 刘景涛, 孙继朝, 张玉玺, 陈玺, 黄冠星. 2010. 无井地区浅层地下水快速取样技术[J]. 工程勘察, 38(7): 46-48.
- 毛志新, 刘宝林, 肖剑, 夏柏如. 2006. 一种便携式重力取样器的研制[J]. 地质科技情报, 25(6): 104-106.
- 文冬光, 林良俊, 孙继朝, 张兆吉, 姜月华, 叶念军, 费宇红, 钱永, 龚建师, 周迅, 张玉玺. 2012. 中国东部主要平原地下水质量与污染评价[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 37(2): 220-228.
- 张玉玺, 孙继朝, 陈玺, 黄冠星, 荆继红, 刘景涛, 向小平, 王金翠, 支兵发. 2011a. 珠江三角洲浅层地下水 pH 值的分布及成因浅析[J]. 水文地质工程地质, 38(1): 16-21.
- 张玉玺, 孙继朝, 黄冠星, 刘景涛, 荆继红, 向小平, 陈玺, 王金翠, 崔海炜. 2011b. 珠江三角洲地区浅层地下水铍的分布及成因探讨[J]. 中国地质, 38(1): 197-203.
- 郑继天, 王建增. 2005. 国外地下水污染调查取样技术综述[J]. 勘察科学技术, (6): 20-23.
- 中国地质科学院. 2015. 中国地质调查局中国地质科学院 2014 年度地质科技十大进展新鲜出炉[J]. 地球学报, 36(1): 129-139.
- 朱亮, 孙继朝, 刘景涛, 张玉玺, 刘春燕. 2015. 兰州市地下水氟分布规律及影响因素分析[J]. 环境科学与技术, 38(4): 144-148.
- 朱亮, 孙继朝, 张玉玺, 刘景涛. 2014. 陕西某地区地下水 Cr(VI)

异常的水化学特征及其富集因素分析[J]. 环境化学, 33(11): 1864-1870.

References:

- Chinese Academy of Geological Sciences. 2015. Top Ten Geological Sci-tech Progresses of China Geological Survey(CGS) and Chinese Academy of Geological Sciences(CAGS) in the Year 2014 Unveiled[J]. Acta Geoscientia Sinica, 36(1): 129-139(in Chinese with English abstract).
- Editorial Office of Acta Geoscientia Sinica. 2010. The regional groundwater pollution investigation and evaluation has been finished for the first time in China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 31(1): 42-42(in Chinese with English abstract).
- GAO Cun-rong, WANG Jun-tao. 2011. Research on Groundwater Organic Contamination Characteristics in 69 Cities of China[J]. Acta Geoscientia Sinica, 32(5): 581-591(in Chinese with English abstract).
- LIU Jing-tao, SUN Ji-chao, WANG Jin-cui, HUANG Guan-xing, XIANG Xiao-ping, JING Ji-hong, CHEN Xi, ZHANG Yu-xi. 2008. Development of Shallow Groundwater Depth-setting Sampler[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 20(5): 56-58(in Chinese with English abstract).
- LIU Jing-tao, SUN Ji-chao, ZHANG Yu-xi, CHEN Xi, HUANG Guan-xing. 2010. Shallow groundwater sampling technology in areas without well[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 38(7): 46-48(in Chinese with English abstract).
- LIU Jing-tao, SUN Ji-chao, ZHANG Yu-xi, CHEN Xi, ZHU Liang, ZHANG Yuan-jing. 2013. Design of sampling method based on sampling comparative test of volatile organic components[J]. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 5(12): 507-514.
- MAO Zhi-xin, LIU Bao-lin, XIAO Jian, XIA Bo-ru. 2006. Development of a Portable Gravity Sampler[J]. Geological Science and Technology Information, 25(6): 104-106(in Chinese with English abstract).
- WEN Dong-guang, LIN Liang-jun, SUN Ji-chao, ZHANG Zhao-ji, JIANG Yue-hua, YE Nian-jun, FEI Yu-hong, QIAN Yong, GONG Jian-shi, ZHOU Xun, ZHANG Yu-xi. 2012. Groundwater Quality and Contamination Assessment in the Main Plains of Eastern China[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 37(2): 220-228(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yu-xi, LIU Jing-tao, ZHANG Yuan-jing. 2015. Hydrochemical Evolution of Shallow and Deep Groundwater in Tongchuan City, China[J]. Journal of Coastal Research, (73): 436-442.
- ZHANG Yu-xi, SUN Ji-chao, CHEN Xi, HUANG Guan-xing, JING Ji-hong, LIU Jing-tao, XIANG Xiao-ping, WANG Jin-cui, ZHI Bing-fa. 2011a. Characteristics and preliminary analyses of the formation of pH in shallow groundwater in the Pearl River delta[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 38(1): 16-21(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yu-xi, SUN Ji-chao, HUANG Guan-xing, LIU Jing-tao, JING Ji-hong, XIANG Xiao-ping, CHEN Xi, WANG Jin-cui, CUI Hai-wei. 2011b. Distribution of beryllium in shallow groundwater of the Zhujiang Delta and a preliminary analysis of its origin[J]. Geology in China, 38(1): 197-203(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Ji-tian, WANG Jian-zeng. 2005. A Comprehensive Report of Overseas Sampling Techniques on Groundwater Contamination Investigation[J]. Site Investigation Science and Technology, (6): 20-23(in Chinese with English abstract).
- ZHU Liang, SUN Ji-chao, LIU Jing-tao, ZHANG Yu-xi, LIU Chun-yan. 2015. Distributing regularity and influencing factors of fluorine in Lanzhou City[J]. Environmental Science & Technology, 38(4): 144-148(in Chinese with English abstract).
- ZHU Liang, SUN Ji-chao, ZHANG Yu-xi, LIU Jing-tao. 2014. Analysis of chemical characteristics and factors for anomalous chromium-rich groundwater in an area, Shanxi Province[J]. Environmental Chemistry, 33(11): 1864-1870(in Chinese with English abstract).