DOI 10.15302/J-SSCAE-2022.05.019

我国地下水污染防治现状与对策研究

任静[1]，李娟[2]，席北斗[3]，杨洋[2]，鹿豪杰[3]，史俊祥[3]

（1. 中华人民共和国生态环境部土壤生态环境司，北京 100006；2. 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心，北京 100012；3. 中国环境科学研究院，北京 100012）

摘要：地下水是我国重要的饮用水源和战略资源，但我国地下水水质总体不容乐观，污染防治工作总体起步较晚，地下水环境保护形势严峻，系统研判地下水污染防治工作面临的问题并提出针对性的对策，是遏制地下水污染趋势并实现稳中向好的重要保障。本文围绕地下水污染防治现有法规政策、管理现状及要求进行了系统梳理，并结合污染防治工作基础，对未来管理形势进行科学研判。结果表明，① 地下水污染底数尚不清晰，分级分类管控基础不牢；② 地下水污染形势日趋复杂，协同监管体系尚不完善；③ 地下水污染治理难度加大，污染防治成果应用不够；④ 地下水环境管理要求不断提升，污染防治创新动能不足。研究建议，通过持续推进重点区域地下水环境调查评估查明污染底数，支撑地下水污染的分级分类管控体系的建设；通过将多级地下水环境监测网建设和信息化监管手段相结合，实现地下水污染全过程防治的智能化、可视化协同监管；通过地下水污染防治项目试点实施及全国21个地下水污染防治试验区建设，形成可复制、可推广的绿色可持续地下水污染防治模式；通过地下水污染溯源、标准体系构建、自主知识产权软件等关键技术问题集中攻坚，提升地下水污染防治技术原始创新与管理支撑能力。希望相关研究能为新发展阶段国家地下水污染防治提供理论指导和决策支撑。

关键词：地下水污染防治；地下水监测网；地下水环境管理

中图分类号：X523　　**文献标识码：**A

Groundwater Pollution Prevention and Control in China: Current Status and Countermeasures

Ren Jing[1], Li Juan[2], Xi Beidou[3], Yang Yang[2], Lu Haojie[3], Shi Junxiang[3]

(1. Department of Soil Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment of the PRC, Beijing 100006, China; 2. Technical Centre for Soil, Agriculture and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China; 3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Groundwater is a significant source of drinking water and a strategic resource for China. However, the groundwater quality in China is unoptimistic and China faces a severe situation regarding groundwater environment protection as its groundwater pollution prevention and control started late. Therefore, problems faced by groundwater pollution prevention and control should be researched and targeted countermeasures be proposed to curb the trend of groundwater pollution and improve groundwater quality. The study reviews the existing regulations and policies, management status, and requirements of groundwater pollution prevention and control in China, and predicts the future management trend. The results indicate the following challenges. (1) The groundwater pollution status is still unclear and hierarchical and classified management of groundwater pollution is lacking. (2) The groundwater pollution forms

收稿日期：2022-07-15；**修回日期：**2022-08-30

通讯作者：席北斗，中国环境科学研究院研究员，研究方向为地下水污染防治；E-mail：xibeidou@263.net

资助项目：中国工程院咨询项目“水污染防治法实施情况评估研究”(2019-XY-01)；国家水体污染控制与治理科技重大专项“京津冀地下水污染防治关键技术研究与工程示范项目”(2018ZX07109)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

become increasingly complex and the regulatory system requires improvement. (3) The groundwater pollution control becomes increasingly difficult and only few control technologies were applied to underground pollution treatment. (4) The requirements of groundwater environmental management are constantly improving; however, the innovation impetus is insufficient. Therefore, we proposed several countermeasures. The pollution status should be identified through continuous investigation and assessment of groundwater environment in key regions, to support the construction of a hierarchical and classified management system. Intelligent, visualized, and coordinated supervision should be achieved by establishing a multilevel groundwater environmental monitoring network and adopting supervisory measures based on information technologies. Green and sustainable models should be formed and promoted through the experimental implementation of groundwater pollution prevention and control projects and by constructing 21 pilot sites. The original innovation and management capacities should be enhanced by focusing on key technical issues such as groundwater pollution traceability, standards system construction, and development of relevant software with proprietary intellectual property rights.

Keywords: groundwater pollution prevention and control; groundwater monitoring system; groundwater environment management

一、前言

2021年《中国水资源公报》[1]显示，地下水资源量为8.1957×10^{10} m^3，约占全国水资源总量的27.7%，地下水源供水量为8.538×10^{11} m^3，占供水总量的14.5%，是我国重要的饮用水源和战略资源，在区域经济社会发展和生态文明建设中具有重要意义。根据《2021中国生态环境状况公报》[2]，“十四五”期间设置了1912个国家地下水环境质量考核点位，2021年获得1900个国家地下水环境质量考核点位水质数据，I~IV类水质点位占79.4%，V类水质点位占20.6%，主要超标指标为硫酸盐、氯化物和钠，地下水水质现状不容乐观。近年来，甘肃兰州“自来水苯污染”、华北平原“渗坑污染”等事件的发生，使地下水污染风险防控压力不断增加，地下水环境监管短板日益突出。

由于地下水资源的重要性，近年来国家对其给予了高度关注，发布了系列地下水污染防治的相关政策，“十三五”期间围绕地下水污染调查、评估、修复与风险管控等方面制定了相应的措施，为提升地下水污染防治能力，开展了国家地下水监测工程、全国地下水基础环境状况调查、京津冀地下水污染防治关键技术研究与工程示范项目、以加油站为代表的地下水重点污染源防渗改造等大量工作。但我国地下水环境污染防治工作起步相对较晚，在地下水环境污染底数掌握程度、地下水监测网络体系建设、复杂条件下的风险管控和修复治理，以及国家管理政策体系建设等方面仍存不足。

随着《中华人民共和国水污染防治法》《地下水管理条例》《“十四五”土壤、地下水和农村生态环境保护规划》《地下水污染防治实施方案》的发布和实施[3~6]，在顶层设计方面，对我国地下水环境保护和污染防治提出了新要求，打开了新局面，明确了主要的任务方向。本文基于我国地下水污染防治基础，结合地下水环境保护和污染防治需求，梳理地下水污染防治面临的问题和挑战，并对未来形势进行研判，提出相应的发展战略和建议，以期为我国地下水污染防治提供决策支撑。

二、我国地下水污染防治工作现状

（一）持续完善地下水环境制度体系

近年来，我国地下水污染防治制度体系建设不断完善，在法律法规、政策规划、标准指南等方面出台相关文件，加强地下水环境监管工作。2017年《中华人民共和国水污染防治法》修订，完善了重点污染源地下水污染防渗措施改造、环境质量监测、地下水资源利用和恢复过程中的污染防治要求等，强化了地下水环境质量监管与改善措施，为我国地下水污染防治工作的开展，提供了强有力的法律支撑与保障。2019年，《地下水污染防治实施方案》（以下简称《方案》）发布，提出了“一保、二建、三协同、四落实”的主要任务，保障地下水型饮用水水源环境安全；建立地下水污染防治法规标准体系、全国地下水环境监测体系；协同地表水与地下水、土壤与地下水、区域与场地污染防治；落实《水污染防治行动计划》确定的四项重点任务。

2021年10月，《地下水管理条例》（以下简称《条例》）发布，在《中华人民共和国水法》《中华人民共和国水污染防治法》《中华人民共和国土壤污染防治法》等法律相关规定的基础上，从调查与规划、节约与保护、超采治理、污染防治、监督管

理等方面作出规定，进一步细化地下水污染防治工作要求。《“十四五”土壤、地下水和农村生态环境保护规划》（以下简称《规划》）围绕《方案》和《条例》进一步细化近期的工作方向和要求，提出建立健全地下水污染防治管理体系，加强污染源头预防、风险管控与修复，强化地下水型饮用水水源保护等重点工作任务 [7]。以上相关政策的发布和实施，为我国地下水污染防治工作指明了方向，给予了重要的指导和支撑。

（二）持续开展地下水环境状况调查

“十三五”期间，生态环境部组织的全国地下水环境基础状况调查评估工作，初步掌握了全国地下水环境概况。目前，已初步建立了地下水环境“双源”清单，建立了包括1862个城镇集中式地下水型饮用水水源、16.3万个地下水污染源在内的信息库。

“十四五”期间，《规划》要求开展“一企一库”“两场两区”（即化学品生产企业、尾矿库、危险废物处置场、垃圾填埋场、化工产业为主导的工业集聚区、矿山开采区）地下水污染调查评估。到2023年，完成一批危险废物处置场、垃圾填埋场和以化工产业为主导的工业集聚区的地下水污染调查评估，进一步掌握重点污染源地下水环境质量和污染风险状况；到2025年，进一步完成一批其他污染源地下水污染调查评估。目前，生态环境部已完成国家级化工园区地下水环境状况调查工作，正在持续推进省级化工园区、危险废物处置场和垃圾填埋场地下水污染调查评估工作，相关成果为地下水污染防治精细化管理提供基础数据支撑。

（三）不断提升地下水环境监管能力

随着“十三五”期间国家地下水监测工程竣工和“十四五”期间地下水环境质量考核点位的设置，我国围绕区域、污染源和地下水型饮用水水源的地下水环境监测网络不断完善，同时不断加强地下水环境监管信息化建设工作。

“十三五”期间，国家地下水监测工程完成建设并通过竣工验收，建成国家级地下水专业监测站点20 469个，其中水利部10 298个，自然资源部10 171个，覆盖全国31个省（区、市），形成了国家—流域—省级—地市级四级监测中心，控制面积3.5×10^6 km^2，密度为每百平方千米0.59个 [8]，填补了我国区域性地下水专业监测网的空白，并组织开展地级及以上城市集中式生活饮用水水源的水质监测工作，按照《中华人民共和国地下水质量标准》（GB/T 14848—2017）加强了地下水水质指标的监测工作。《2021中国生态环境状况公报》显示，根据《“十四五”国家地下水环境质量考核点位设置方案》，“十四五”期间生态环境部共布设1912个国家地下水环境质量考核点位，覆盖全国一级和二级水文地质分区、339个地级及以上城市。各省（市）已建立了良好的地下水环境监测体系，能够面向全国起到良好的示范带动作用。2019年年底，北京市已实现山区、平原全域覆盖、岩溶水、裂隙水、孔隙水全包含，无机污染物、有机污染物并重的地下水环境监测体系。

各省（自治区、直辖市）不断提升地下水环境监管信息化能力，围绕地下水生态环境监管信息平台建设，四川、福建等已初步完成省级平台建设，黑龙江、河南、青海、西藏等正在开展省级平台建设。山东省滨州市结合实际地下水污染防控要求，率先完成市级平台建设工作，平台涵盖了滨州市地下水环境基础信息数据动态管理，地下水污染防治区划定，“双源”地下水调查评估管理，重点园区地下水在线监测预测、预警、溯源等功能，同时可实现与国家级平台化工园区模块的互联互通，并通过一张表、一张图的“地下水云成果”展示查阅，为滨州市地下水生态环境综合分析和形势研判等监管需求提供有力支撑。目前，其他省（自治区、直辖市）逐步开展地下水环境监管信息平台建设，并将“大网络、大系统、大数据”等思路结合到地下水生态环境监管信息平台建设工作当中。

（四）强化支撑地下水污染风险管控

“十三五”期间，针对地下水污染源头风险管控，相继开展了加油站等重点污染源的防渗改造、废弃井封井回填等工作。全国9.6万座加油站的36.2万个地下油罐完成双层罐更换或防渗池设置。各省（市）依据《中华人民共和国水污染防治法》《水污染防治行动计划》等政策要求，稳步推进化工园区、尾矿库、垃圾填埋场等地下水重点污染源的防渗改造工作。针对报废矿井、钻井或者取水井

等，我国一些地方政府或企业已出台封井回填相关的规划文件。如北京市2013年发布的《北京市地下水保护和污染防控行动方案》，要求全市4216眼废弃机井全部封填。中国石油化工集团有限公司发布了企业标准《废弃井封井处置规范》（QSH0653—2015），用于指导报废钻井的封井回填工作。北京市水务局、中国石油天然气集团有限公司、中国石油化工集团有限公司等报废矿井、钻井或者取水井所有权单位，目前正在开展封井回填工作。同时，全国1170个地下水考核点位质量极差比例达到了《水污染防治行动计划》确定的目标任务，极差比例控制在15%左右。

“十四五”期间，中央生态环境资金项目储备库设置地下水污染防治项目储备库，持续重点支持地下水环境状况调查评估、地下水环境监管能力建设和地下水污染防控与修复等类型的项目，组织各地持续推进地下水污染防治试点项目申报工作，加强地下水污染防治项目储备，不断提高地方地下水环境管理水平。全国31个省（自治区、直辖市）稳步推进地下水污染防治项目的申报，实现了地下水污染防治工作有序、有效开展，并正在形成一批可复制、可推广的地下水污染防治技术和管理模式，为全国重点地区地下水污染防治工作提供了重要支撑。2021年12月，全国确定21个地下水污染防治试验区，需要完成地下水污染防治重点区划定，开展在产企业的地下水污染防治工作，识别地下水型饮用水水源补给区，并开展油气田采出水回注地下水污染防治，依赖地下水的生态系统保护、地下水生态环境管理制度和经济政策的探索创新等特色建设任务，相关成果能够为全国地下水污染防治工作起到积极的示范作用。

（五）深入推进地下水污染防治研究

“十三五”期间，国家水体污染控制与治理重大专项中首次设置了“京津冀地下水污染防治关键技术研究与综合示范项目”，以京津冀地下水污染防治关键技术研究为主线，以地下水环境安全问题为导向，通过构建京津冀地下水污染防治战略，研发了地下水污染监测预警与数字化技术平台，对典型化工行业、垃圾填埋场、回补区风险防控等关键技术进行研发和综合示范，对于促进区域地下水环境安全和生态文明建设具有重要意义，既有“十一五”“十二五”技术成果综合应用，更体现出国家对地下水环境管理技术支撑的需求。项目针对特定问题开展的技术研发，不仅针对性强，更突出技术应用性，对水专项“水污染治理技术”和“水环境管理技术”两大技术体系的构建提供了地下水方面的科技支撑，为系统提升我国典型区域的地下水污染防治与管理水平提供了良好借鉴[9]。

“十四五”期间，国家进一步提高地下水污染防治科学研究的支持力度，科学技术部、教育部、自然资源部、生态环境部等部门共同制定了国家重点研发计划“大气与土壤、地下水污染综合治理”重点专项实施方案，从监测监管技术、成因机制研究、治理修复技术、决策支撑技术、典型区域实践和青年科学家项目6大方面，共设立了土壤及地下水污染防治项目16项。所设立项目以土壤、地下水污染协同防治为核心，拟解决区域土壤/地下水多介质污染的形成机理、水土污染的相互影响等基础科学问题，突破多要素立体监测预警、污染源实时智能监管、土壤地下水复合污染协同绿色修复等核心技术，建立污染场地土壤与地下水协同综合治理集成示范区，形成区域多污染物跨行业高效治理体系。

三、我国地下水污染成因分析

（一）地下水污染来源复杂多样

造成地下水污染的来源多样，包括工业污染源、农业污染源和生活污染源等。其中，工业污染源是造成地下水污染的主要来源，尤其是工业污染源生产过程中产生的“跑冒滴漏”等现象，导致污染物直接渗入到土壤和地下水中，造成地下水严重污染。农药、化肥、农灌以及牲畜和禽类的粪便等农业污染源，同样会随水渗入到土壤和地下水中。垃圾填埋场渗滤液泄漏、城市生活污水等生活污染源，均可造成地下水污染[10]。另外，我国地下水的水文地质条件相对复杂，造成我国地下水污染类型复杂多样，地下水污染的治理工作难度较大。

（二）地下水污染防治基础薄弱

目前我国的地下水污染防治在相关法规标准体系、地下水环境监测体系、地下水污染预警应急体系、地下水环境管理体制和运行机制等方面基础仍

比较薄弱，合力难以形成，制约着我国的地下水污染治理工作。虽然近年来地下水污染防治标准体系不断完善，但在稀土开发、页岩气开采等新兴重要产业，矿泉水等地下水型饮用水源保护等方面仍需制定 / 修订相关标准体系。地下水环境监测是预防地下水污染的重要手段，长期以来，我国在重点区域、重点城市地下水动态监测和资源量评估方面取得了一些数据，但饮用水源周边地下水监测严重不足，一旦发生地下水污染事故，难以及时发现和准确溯源。地下水污染源监测网尚未建立，难以满足源头管控要求。

（三）地下水污染防治意识不足

长期以来，地表水环境的治理是我国水环境保护的重点。不同于地表水污染直观可见的特征，地下水污染具有隐蔽性和滞后性，导致地下水污染防治工作重视不足，起步较晚，在地下水生态环境保护方面的宣传报道不足，政府、企事业单位以及公众尚未建立良好的地下水污染防治意识，对地下水环境污染的危害性和难以恢复性认识不到位。另外，在油气田和地下水资源等的开发过程中忽视对地下水水质的保护，阻碍和影响着我国地下水污染防治工作的开展。

四、我国地下水污染防治工作面临的问题

（一）地下水污染底数尚不清晰，分级分类管控基础不牢

2020 年 6 月 10 日，《第二次全国污染源普查公报》（以下简称《公报》）发布 [11]，结果显示，2017 年年底，全国各类污染源数量是 358.32 万个（不含移动源），包括工业源 200 多万个，生活源 60 多万个，畜禽规模养殖场 30 多万个，集中式污染治理设施 8 万多个，可见各类污染源数量巨大。同时，我国具有多种多样的水文地质条件，孔隙水、裂隙水和岩溶水等多种类型并存，导致地下水环境污染问题更加复杂，但目前地下水污染风险源筛查技术水平相对落后，“一企一库”“两场两区”等重点污染源的污染底数尚不清晰，风险识别难度大，个别地方政府与企业地下水污染防治主观意识不强，造成重点污染源地下水防渗漏措施总体建设与改造程度不高，地下水污染事件时有发生。目前，生态环境部正在组织开展化工园区、危险废物处置场和生活垃圾填埋场地下水环境状况调查工作，但重点污染源和地下水型饮用水水源等重点区域的地下水环境状况尚未全面掌握，对《规划》要求的地下水污染防治重点区划定、保障地下水型饮用水水源安全等重点工作的支撑依然不足，难以实现不同风险源的分级分类管控。

（二）地下水污染形势日趋复杂，协同监管体系尚不完善

园区渗漏、矿山尾渣、矿井涌水、垃圾填埋等引发的地下水污染问题日益凸显，部分地区地下水饮用水源因保护力度不足，已转为备用水源。由于地下水污染具有隐蔽性、滞后性等特点，地下水环境监测井网建设是防范地下水污染扩散的基础支撑，地下水水质在线监测是及时发现地下水污染的重要手段，地下水污染预测预警是判断地下水污染风险的关键技术方法。然而，我国地下水污染类型复杂、问题突出，对比国家地下水监测工程和各类地下水环境监测井数量，与第二次污染源普查的数量仍存在巨大差距，地下水保护措施与监测井网密度不能有效支撑环境管理，跨部门“双源”监测与国家地下水监测工程融合度不高，用于指导重点区域和污染源地下水环境监测工作开展的监管手段、技术规范和预警能力尚未形成，不同区域和监控要素的地下水环境监测网之间缺乏互联互通，造成地下水监测数据储备、预测预警和监督能力不足。

（三）地下水污染治理难度加大，污染防治成果应用不够

由于地下水污染治理具有复杂性和难恢复性，一旦受到污染，一般修复技术的极限仅能消除人群健康风险，水资源功能恢复基本无法实现，裂隙水、岩溶水分布区域的污染扩散控制难度更大。特别是非均质、低渗透等地层条件下，地下水污染的过程、范围和程度的识别难度更高，难以精准调查和刻画地下水污染情况。低渗透地层及透镜体的反向扩散、原位氧化和生物修复过程中的有毒副产物生成、地下水修复中的污染物反弹、大型复杂污染场地的治理与管控、地下水中新型污染治理也是污染场地风险管控和修复过程中需要进一步解决的难

题 [12]。另外，地下水污染防治尚处于“曝光一处、管控一处”的状态。预见性、先导性的地下水污染治理技术模式储备不足，成果转化应用不够，地下水污染防治技术短板日益凸显。

（四）地下水环境监管要求提升，污染防治创新动能不足

地下水环境管理是一项系统的、复杂的工作，涉及调查、监测、评估、风险防控、修复治理等多个方面，在产企业的地下水污染风险管控与修复缺少法律依据，化工园区、矿山开采区等重点区域和行业的地下水环境监管尚存空白，亟需相关方面的基础科学研究，系统总结研究成果为地下水环境管理提供技术支撑。然而，《全国地下水污染防治规划（2011—2020年）》《华北平原地下水污染防治工作方案》落实项目寥寥、资金投入严重短缺。“十三五”期间，国家水体污染控制与治理重大专项中仅设置1项地下水污染防治相关的项目。“十四五”期间，虽然国家重点研发计划“大气与土壤、地下水污染综合治理”重点专项实施方案逐步加强对地下水污染科学研究的支持，但相比于大气、地表水等方面支持力度仍有差距，创新研发动力依然不足。另一方面，与发达国家相比，目前适用于我国不同区域、不同水文地质条件，支撑重点区域和污染源地下水环境状况调查评估、监测预警、在产企业地下水污染风险管控与修复等的规范、导则、技术指南尚不完善，地方政府部门、企业、工程所有权人等责任主体在地下水污染防治工作全面开展与实施过程中缺乏充分有效的指导和评判依据，使得地下水污染防治工作缺乏抓手、工作滞后。

五、我国地下水污染防治对策建议

（一）加快查明污染底数，持续推进重点区域地下水环境调查评估

结合第二次全国污染源普查、重点行业企业用地土壤污染状况调查等工作成果，按照《方案》《规划》等政策文件要求，持续推进京津冀、长三角、珠三角、黄河流域、长江流域等重点区“一企一库”“两场两区”重点污染源地下水环境调查评估工作，加快查明污染底数。利用调查评估结果，结合地下水污染源强评价与分类防控管理技术，划分重点污染源防控等级，形成地下水优先防控污染源清单；综合考虑“地表水–地下水、土壤–地下水、区域–场地”之间的生态环境联系，按照“七分防，三分治”的理念，实施重度风险源修复治理、中度风险源监控预警、轻度风险源制度监管的三级管理模式，实现“一源一策” [13]。沿污染源地下水流路径揭示污染物迁移转化的动力学过程与生态效应，并按照“地表–含水层–敏感受体”三界面法，优化筛选不同防控等级污染源的风险管控或修复治理技术，在重点源地下水污染防治过程中精准施策。结合重点区水文地质条件与地下水环境质量现状，开展地下水污染防治区划，分区分类针对性制定污染防治对策 [9]，逐步完成地下水污染的分级分类管控。

（二）促进数据网络融合，统筹构建地表地下协同监管技术体系

结合地下水污染防治重点区和污染源分类管理对策，整合现有的地表水监测断面、土壤污染状况详查监测井、地下水环境监测井等，完善“双源”地下水环境监测井建设、运行维护和管理体系，衔接国家地下水监测工程和“十四五”国家地下水环境质量考核点位，统筹构建国家级、省级与“双源”的三级地下水环境监测网，提升地表地下协同监管的硬件基础。结合“大网络、大系统、大数据”等思路，整合不同管理部门和层级的地下水环境监测基础信息，建立地下水监测信息报送和共享机制，引进区块链等技术手段，强化监测数据保真，保障数据“进得来，管得住” [14]。集成三维渲染、仿生地理信息系统（GIS）、数字孪生等技术应用，强化三维地层、三维水文地质模型、三维污染羽可视化呈现，高效支撑重点环境问题分析研判，促进数据网络融合。运用人工智能等技术，根据重点污染源地下水调查评估结果，完善开发地下水污染风险管控与修复精细化管理和智能化决策功能，提升地表地下协同监管的软件基础，实现“地表–含水层–敏感受体”全过程的智能化和可视化监测、预测、预警、管控等监管功能。

（三）推广试点示范效应，加快形成绿色和可持续的污染防治模式

充分发挥中央生态环境水污染防治专项资金支

持的地下水污染防治项目和地下水污染防治试验区建设工作的“带头”作用，落实在产企业地下水防渗和监测措施，开展地下水污染风险管控和地下水污染修复。特别是针对地下水修复难度大，易出现脱尾和反弹等问题，深入开展修复治理与“过程阻断、长期监测、制度控制”的风险管控措施相结合的治理模式研究，实现地下水污染场地多技术耦合修复，开展新材料和模块化集成装备研发，形成绿色、经济、可持续的地下水污染治理模式。在加强地下水污染防治关键技术研发的同时，集成产出可复制、可推广的地下水污染防治技术和管理模式，定期宣传地下水污染防治成果，推广试点示范效应。

（四）攻克关键技术难题，系统提升地下水污染防治监管决策力

充分借鉴国内外先进工作经验，加大不同层面地下水污染防治科研课题研究力度，就地下水污染调查、监测预警、污染溯源、风险管控、修复治理、标准体系构建、自主知识产权软件等“卡脖子”技术问题进行集中攻坚，提升地下水污染治理领域的原始创新能力。按照地下水污染防治工作的基本流程和步骤，从调查、监测、评估、风险防控、修复治理等方面出发，以现有《地下水质量标准》《地下水环境监测技术规范》《集中式地下水饮用水水源地补给区污染源强评价与分级技术指南》等标准规范体系为基础，深入挖掘地下水污染防治相关工作与科学研究成果，分级（国标、行标、团标等）制定地下水污染防治技术规范与指南文件等，出台涵盖地下水环境状况调查、监测网络与信息化建设、污染风险评价与管控、污染防渗改造、污染修复等技术的规范性文件，以满足不同层面的地下水环境监管需求。

参考文献

[1] 中华人民共和国水利部. 2021 中国水资源公报 [EB/OL]. (2022-06-16) [2022-07-15]. http: //www. mwr. gov. cn/xw/slyw/202206/t20220616_1579606.html.
Ministry of Water Resources of the People’s Republic of China. Water resources bulletin of China 2021 [EB/OL]. (2022-06-16) [2022-07-15]. http: //www. mwr. gov. cn/xw/slyw/202206/t20220616_1579606.html.

[2] 中华人民共和国生态环境部. 2021 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. (2022-05-28) [2022-07-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-05/28/5692799/files/349e930e68794f3287888d8dbe9b3ced.pdf.
Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China. Ecological and environment bulletin of China 2021 [EB/OL]. (2022-05-28) [2022-07-10]. http://www. gov. cn/xinwen/2022-05/28/5692799/files/349e930e68794f3287888d8dbe9b3ced.pdf.

[3] 中华人民共和国国务院. 中华人民共和国水污染防治法 [M]. 北京: 中国法制出版社, 2017.
The State Council of the People’s Republic of China. Law of the People’s Republic of China on prevention and control of water pollution [M]. Beijing: China Legal Publishing House, 2017.

[4] 中华人民共和国国务院. 地下水管理条例 [M]. 北京: 中国法制出版社, 2021.
The State Council of the People’s Republic of China. Groundwater management ordinance [M]. Beijing: China Legal Publishing House, 2021.

[5] 中华人民共和国生态环境部. “十四五”土壤、地下水和农村生态环境保护规划 [EB/OL]. (2022-01-04) [2022-07-10]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202201/t20220104_966043.shtml.
Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China. “The 14th five-year Plan” soil, groundwater and rural eco-environmental protection planning[EB/OL]. (2022-01-04)[2022-07-10]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202201/t20220104_966043.shtml.

[6] 中华人民共和国生态环境部. 地下水污染防治实施方案 [EB/OL]. (2019-03-28)[2022-06-24]. http: //www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201904/t20190401_698148.html.
Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China. Implementation plan of groundwater pollution prevention and control [EB/OL]. (2019-03-28)[2022-06-24]. http: //www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201904/t20190401_698148.html.

[7] 苏克敬. 推进《地下水管理条例》实施 努力开创我国地下水依法治污新局面 [J]. 中国环境监察, 2022 (1): 50–52.
Su K J. Working on groundwater pollution prevention and control under groundwater management ordinance [J]. China Environment Supervision, 2022 (1): 50–52.

[8] 中国地质调查局地质环境监测院. 国家地下水监测工程(自然资源部门)顺利通过竣工验收 [EB/OL]. (2019-12-31) [2022-06-24]. http: //www. cigem. cgs. gov. cn/dzdcyjcgc/gjdxsjcgc/201912/t20191231_499927.html.
Geological Environment Monitoring Institute of China Geological Survey. The national groundwater monitoring project (Ministry of Natural Resources) was successfully completed [EB/OL]. (2019-12-31) [2022-06-24]. http: //www. cigem. cgs. gov. cn/dzdcyjcgc/gjdxsjcgc/201912/t20191231_499927.html.

[9] 席北斗, 李娟, 汪洋, 等. 京津冀地区地下水污染防治现状、问题及科技发展对策 [J]. 环境科学研究, 2019, 32(1): 1–9.
Xi B D, Li J, Wang Y, et al. Strengthening the innovation capability of groundwater science and technology to support the coordinated development of Beijing-Tianjin-Hebei Region: Status, quo, problems and goals [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(1): 1–9.

[10] 王焰新. 地下水污染与防治 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
Wang Y X. Groundwater contamination [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.

[11] 第二次全国污染源普查公报 [J]. 环境保护, 2020, 48(18): 8–10.
The second national pollution source census bulletin [J]. Environmental Protection, 2020, 48(18): 8–10.

[12] 侯德义. 我国工业场地地下水污染防治十大科技难题 [J/OL]. 环境科学研究: 1–15 [2022-07-24]. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.04.18.
Hou D Y. Ten grand challenges for groundwater pollution prevention and remediation at contaminated sites in China [J/OL]. Research of Environmental Sciences: 1 – 15 [2022-07-24]. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.04.18.

[13] 李翔, 汪洋, 鹿豪杰, 等. 京津冀典型区域地下水污染风险评价方法研究 [J]. 环境科学研究, 2020, 33(6): 1315–1321.
Li X, Wang Y, Lu H J, et al. Groundwater pollution risk assessment method in a typical area of Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(6): 1315–1321.

[14] 黄燕鹏, 汪远昊, 王超, 等. 基于自组织神经网络和K-means的场地地下水污染特征分析与分区管控研究 [J]. 环境工程, 2022, 40(6): 31–41, 47.
Huang Y P, Wang Y H, Wang C, et al. Characteristics analysis and zoning control of groundwater pollution based on self-organizing maps and K-means [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(6): 31–41, 47.