

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2021.0017

谢浩, 李军, 邹胜章, 等. 基于文献计量学的地下水污染研究现状[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(1): 168-178. XIE H, LI J, ZOU S Z, et al. Research status of groundwater pollution based on bibliometrics[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 168-178. (in Chinese)

# 基于文献计量学的地下水污染研究现状

谢浩<sup>1</sup>, 李军<sup>1,2</sup>, 邹胜章<sup>1</sup>, 梁永平<sup>1</sup>, 申豪勇<sup>1</sup>, 周长松<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 河北建筑工程学院, 河北 张家口 075000)

**摘要:** 为了解国内外地下水污染领域研究现状和重点, 梳理 2009—2019 年国内外学术期刊收录的地下水污染领域高质量文献 8 117 篇, 利用可视化软件 CiteSpace V. 5. 6. R3 绘制科学知识图谱。通过对地下水研究领域论文发文量、研究内容、研究机构和发文作者统计、聚类 and 可视化, 多维度发掘地下水污染研究的整体形势。结果显示: 地下水污染研究领域科研论文发文量总体呈增长趋势, 研究重点主要围绕污染物特征、污染评价和污染修复等 3 个方面展开, 硝酸盐、砷污染已成为地下水污染的研究重点; 中国地质科学院水文地质环境地质研究所和吉林大学对国内地下水污染领域的发展具有重要贡献, 且研究团队随时间呈分散式、多元化发展; 中国地质大学、中国科学院和美国地质调查局是最具国际影响力的机构, 中国地质大学(武汉)王焰新院士团队在地下水污染研究领域极具国际影响力。在我国生态文明建设需求下, 地下水污染修复由理论研究向污染场地应用转化仍是当前研究的趋势。

**关键词:** 地下水; 污染; 硝酸盐; 文献计量学; 研究现状

中图分类号: P641      文献标志码: A      开放科学(资源服务)标志码(OSID):



地下水是水资源的重要组成部分, 因其相对的安全性、持续性且分布广泛, 不仅是全球范围内重要的人类用水来源, 同时也在生态系统中发挥着重要作用。绝大部分欧美国家以地下水为主要饮用水源, 对我国而言, 地下水为我国约 70% 人口提供饮用水源, 农村地区 95% 的人口饮用地下水<sup>[1,2]</sup>。然而, 过度和不当的人类生产生活活动, 使得地下水遭受不同程度污染, 特别是在中大型城市、农业集约区和矿物开采区。部分地下水存在污染来源多样、污染组分复杂、污染范围大、污染物质量浓度高等复杂污染问题<sup>[3,5]</sup>, 且污染物逐渐由浅层向深层地下水转移<sup>[6,7]</sup>。在有限水资源量情况下, 地下水污染将直接减少地下水资源可用水量, 增加地下水安全风险。

地下水污染治理是我国生态文明建设的迫切需求, 也是水文地质和环境污染研究领域的重点与热

点。如何降低污染物质量浓度, 甚至去除污染物, 以间接增加可利用地下资源量<sup>[8]</sup>, 是各国政府和科技人员关注的重点。目前, 地下水污染综述报道较多, 已对地下水污染领域进行较系统的归纳和展望<sup>[9,11]</sup>, 但缺乏量化分析。随着国内外地下水污染研究论文数量逐年增多, 有必要利用文献计量学方法对国内外相关学术论文进行统计分析, 从量化角度, 系统性、综合性地揭示地下水污染领域的研究历史与现状、研究重点与热点。

文献计量学是一种可定量分析所有知识载体形式的科学方法, 可视化图谱可将大量文字形式论文转化为直观可视化图谱, 以揭示某一研究领域的发展历程、研究现状, 辅助预判研究趋势。美国德雷塞尔大学陈超美教授开发的 CiteSpace 软件是当下最流行的知识图绘软件之一<sup>[12,14]</sup>, 是在科学计量学和

收稿日期: 2020-02-20      修回日期: 2020-05-25      网络出版时间: 2020-06-01

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200529.1642.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41672253); 广西重点研发计划(桂科 A B18050026); 自然资源部地质调查项目(DD20190334)

作者简介: 谢浩(1991—), 男, 河北石家庄人, 实习研究员, 主要从事水文地质与地下水污染防控研究。E-mail: xiehao9898@163.com

通信作者: 申豪勇(1988—), 男, 山西长治人, 助理研究员, 博士, 主要从事岩溶水文地质研究。E-mail: shenhaoyong@karst.ac.cn

数据可视化背景下发展起来的一种引文可视化分析软件,已在众多领域成熟应用<sup>[15-17]</sup>。目前多数国内相关研究<sup>[18-20]</sup>仅以国内文献或仅以一年国内外文献为数据源,而多年国内外文献数据更能保证分析结果的整体性和准确性。此外,地下水污染研究领域近些年发文数量较大,仅通过综述并不能从量化角度全面揭示地下水污染领域研究进展。因此,本文以2009—2019年地下水污染研究领域发表的8117篇国内外高质量期刊论文为数据源,主要应用CiteSpace软件对地下水污染领域进行多角度深度解析,以期客观准确地揭示该领域研究进展,为后续研究和创新提供新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

中文文献来源于中国知网(CNKI),选择“期刊”选项,检索词为“地下水”并含“污染”,检索时间跨度为2009—2019年。为获取较高质量期刊论文,本文仅筛选EI期刊、核心期刊、CSSCI和CSCD收录的论文。共检索出1927篇论文,经人工筛选、剔除,获得1505篇有效论文。

外文文献来源于Web of Science中的Science Citation Index Expanded(SCIEXPANDED),设置主题检索,检索词为“groundwater and (pollut\* or contaminat\*)”,检索时间跨度为2009—2019年完整年,文献类型选择“ARTICLE”与“REVIEW”。共检索文献19800篇,剔除不相关和相关性较小文献后,获得6612篇有效论文。

### 1.2 分析方法

基于Excel统计不同年份中外期刊论文发文量。文献计量分析使用CiteSpace软件,采用CiteSpace V. 5.6.R3版本(<http://cluster.ischool.drexel.edu/~cchen/citespace/download/>)。在分析文件夹下分别新建以input、output命名的文件夹,对CNKI和Web of Science导出的原始数据进行格式转化(Format Conversion)和去重(Remove duplicates);新建date和project文件夹,将转化好的数据置于data文件夹,用于可视化分析。

可视化知识图谱中, $Q$ 值大于0.3, $S$ 值大于0.5,图谱结果可信。为了识别元素在某时段内的突出贡献,进行Burstness排名识别,Minimum Duration参数设置为4,以获取连续4年突出的元素。图谱中,节点和文字的大小表示出现频率高低程度,节点内不同圈层颜色和厚度表示不同年份所占份额

大小,各节点间连线粗细和颜色表示两者间关联紧密程度和年份。

## 2 结果与分析

### 2.1 发文数量

统计多年发文量可直观揭示地下水污染研究领域活跃程度。本文筛选2009—2019年发表的中文文献1505篇、外文文献6612篇,从总量上看,外文文献数量是中文的4.39倍。由图1可知,地下水污染研究领域期刊发文量总体呈增加趋势,中外文发文量变化趋势有明显差异。中文文献由缓慢增长阶段逐渐转变为缓慢下降阶段:2009—2014年为缓慢增长阶段,由99篇/a增加至198篇/a,呈连年增加趋势,平均年增加量为19篇;2014年至2019年为缓慢下降阶段,由198篇/a下降至101篇/a;2016年和2018年发文量略有增加,但总体呈减少趋势,平均年减少量为19篇。外文文献总体呈增加趋势,但不同时段增速差异明显:2009—2014年为缓慢增加阶段,由444篇/a增加至531篇/a,平均年增加量为17篇;2014—2019年为快速增加阶段,由531篇/a增加至889篇/a,平均年增加量为71篇。2014年后中文文献发文量减少的同时外文文献增速反而加快,说明2014年后地下水污染研究领域的中国学者更加关注和着手于发表外文文章。原因主要有2个方面:一方面是2014年后我国学者更注重学术成果的国际传播和影响力;另一方面是我国科学研究成果认证导向和SCI奖励政策驱动的结果。此外,2020年2月教育部、科技部印发了《关于规范高等学校SCI论文相关指标使用树立正确评价导向的若干意见》,预计在该政策背景下,地下水污染研究领域中文文献发文数量将呈增长趋势。

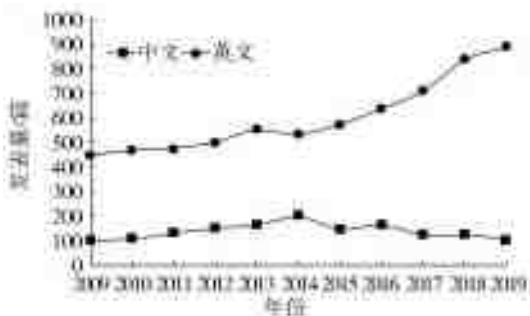


图1 2009—2019年地下水污染研究领域发文量

Fig. 1 The number of published papers on groundwater pollution research from 2009 to 2019

### 2.2 研究重点方向

关键词是论文研究内容与核心观点的集中体现,通过关键词共现图谱可揭示地下水污染领域的

研究重点和热点<sup>[21]</sup>。综合图 2、表 1, 中英文关键词地下水和污染均频率最高, 节点最大, 且绝大多数关键词以地下水和污染为中心紧密聚集。据关键词可将地下水污染研究归纳为地下水典型污染物、地下水污染评价和地下水污染修复三大方向。同时, Burstness(强引突显)结果显示, 尾矿库、傍河水源地和包气带关键词在中文文献中呈连续 4 年突显, 主要涉及尾矿库库区和周边区域地下水污染特征、污染物运移规律、污染风险评价、健康风险评价和污染修复方面研

究<sup>[22-25]</sup>, 傍河水源地典型污染物污染风险评价与迁移转换特征<sup>[26-27]</sup>及包气带防污性能评价<sup>[28]</sup>等问题。外文文献中近 4 年关键词突显包括 Iran 和 Marcellus, 近些年科研人员较多关注伊朗(Iran)地下水硝酸盐、氟化物和砷污染问题<sup>[29-31]</sup>以及美国宾西法尼亚州马塞勒斯(Marcellus)页岩气开采引发的甲烷污染地下水问题<sup>[32-33]</sup>。此外, 我国华北平原地下水硝酸盐污染也是多年持续关注重点研究内容之一<sup>[34]</sup>。

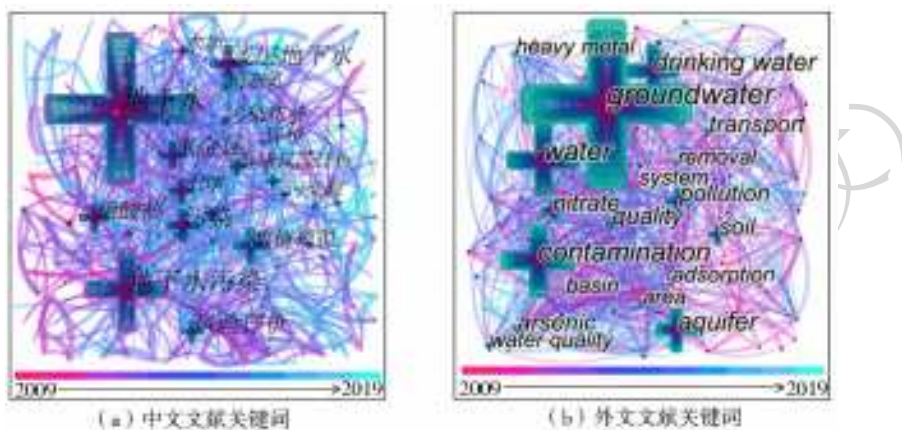


图 2 2009—2019 年中外文文献中地下水污染研究领域关键词共现图谱

Fig. 2 The co-occurrence map of key words on groundwater pollution research in Chinese and foreign articles from 2009 to 2019

表 1 2009—2019 年中外文期刊中地下水污染领域高频关键词

Tab. 1 High frequency key words in groundwater pollution in Chinese and foreign articles from 2009 to 2019

中文		外文		中文		外文	
文献关键词	出现频次	文献关键词	出现频次	文献关键词	出现频次	文献关键词	出现频次
地下水	616	groundwater	2347	污染场地	34	quality	438
地下水污染	162	contamination	1231	污染特征	28	heavy metal	389
污染	71	water	1165	水质评价	27	removal	383
浅层地下水	69	drinking water	879	有机污染	27	area	378
硝酸盐	61	aquifer	846	水质	23	adsorption	366
数值模拟	61	nitrate	622	硝态氮	22	water quality	362
重金属	52	pollution	621	硝酸盐污染	20	system	359
土壤	51	soil	575	评价	20	basin	351
风险评价	47	arsenic	471	修复	19	India	336
健康风险评价	39	transport	441	岩溶地下水	18	sediment	330

### 2.2.1 典型地下水污染物

地下水中污染物总体可划分为三氮、重金属和有机物等 3 类。根据图 2 和表 1, 地下水污染重点关注的污染物包括硝酸盐、砷和部分有机物, 其中, 地下水中硝酸盐污染问题受到全球广泛关注。近些年, 城市化生产生活污水排放, 集约化农业生产农药化肥过量使用, 大规模养殖粪便堆放, 均在一定程度上导致地下水硝酸盐质量浓度升高<sup>[35-36]</sup>。而农业区过度使用氮肥和较高的灌溉水量使得地下水硝酸盐质量浓度普遍较高<sup>[37]</sup>, 如印度北部、美国高平原

以及我国华北平原地区均出现不同程度地下水硝酸盐污染<sup>[34]</sup>。饮用高质量浓度硝酸盐水会引发蓝婴症(婴儿易感)和高血红蛋白症, 也是某些癌症的诱发因素<sup>[38]</sup>。硝酸盐污染的普遍性和危害性使其成为当前最为关注的典型污染物之一。如何降低污染区地下水硝酸盐质量浓度, 防止未来全球气候变化和人类过度活动进一步加剧地下水硝酸盐污染仍是当前亟待解决的环境问题。

针对区域地下水硝酸盐污染, 采取物化手段显然不现实, 而生物修复去除效率相对低, 并存在一定

滞后性。污染源头控制相对易实现,且成本较低,而硝酸盐污染来源识别是实现源头控制的关键环节。地下水硝酸盐污染识别已从定性分析向量化发展(表2)。早期研究主要利用相对稳定组分来识别硝酸盐来源,Widory等<sup>[39]</sup>利用 $\text{NO}_3^-$ 与 $\text{Cl}^-$ 质量浓度关系,定性识别出法国中部阿列河流域地下水硝酸盐污染的化肥来源( $\text{NO}_3^-$ 高, $\text{Cl}^-$ 低)和废水来源(两者均高)等两种来源。环境同位素( $^{15}\text{N}$ 、 $^{18}\text{O}$ 、 $^{11}\text{B}$ )的引入使得地下水硝酸盐源解析向量化发展。不同质量环境同位素在转移、转化过程中分子反应速率不同<sup>[40]</sup>,分馏差异最终体现在污染来源物中环境同位素差异,这是污染来源定量识别的基础。计算模型的出现和优化为硝酸盐源解析提供了技术支撑,特别是三元模

型、多元模型的出现,使得精细定量成为可能。卢丽等<sup>[41]</sup>利用 IsoSource 模型对桂林寨底地下河硝酸盐来源进行定量研究,据 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分析结果,最终确定化肥、动物粪便与污水和土壤有机氮3种主要来源比例分别为23%~78%、6%~58%、6%~38%。目前,多组分、多方法联用已成为地下水硝酸盐污染源解析的主要研究方法,如多种环境同位素联用、定量模型与主成分分析联用等<sup>[42]</sup>。此外,通过分析反硝化菌群、组分特征( $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 比值)、电子受体等,判断污染物迁移转化过程中反硝化作用的发生程度<sup>[43-44]</sup>,可有效降低氮素转移、转化过程中环境同位素分馏引起的计算偏差,有利于优化计算结果。

表2 地下水硝酸盐污染源解析方法

Tab. 2 Analytical method of nitrate pollution source in groundwater

发展阶段	涉及主要方法	应用特征
定性识别	稳定组分特征 二元模型	$\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、难溶解药剂等与 $\text{NO}_3^-$ 离子比 <sup>[39, 45]</sup> 线性混合模型 <sup>[46]</sup>
定量识别	三元模型 多元模型	IsoSource 模型 <sup>[47]</sup> 贝叶斯同位素混合模型 <sup>[48]</sup>
优化定量	定量方法优化 发生过程优化	多种特征组分、方法联用识别 <sup>[42]</sup> 有利于精细化定量解析 细化硝酸盐迁移转化过程中物化生作用影响 <sup>[43]</sup>

### 2.2.2 地下水污染评价

为了评估地下水的污染程度以及对人体健康的影响,相关学者展开了地下水污染评价的研究。

由图2和表1可知,地下水污染评价主要集中在3个方面:一是利用不同水质评价方法对地下水物化特征多个指标进行质量评价,获得可信的地下水水质评价结果<sup>[49-50]</sup>;二是在地下水防污性能(脆弱性)评价基础上,结合污染源特性和地下水功能价值进行地下水污染风险综合评价<sup>[51-54]</sup>;三是利用不同的健康风险评价模型,定量评价地下水污染对人体健康的危害程度,是以保护人体健康为考虑发展起来的<sup>[9, 55-56]</sup>。目前,国内针对地下水污染评价的探讨,一方面是围绕老方法的参数设置、评价范围和局限性展开并对其进行优化;另一方面进行分析方法耦合研究和创建新理论并在应用中分析其有效性。地下水是人类理想的饮用水来源,所以评估其水质和判断对人体是否有健康风险显得尤为重要。

长期皮肤接触或饮水摄入被污染的地下水会对人体产生致癌和非致癌等的健康风险。从污染物来看,地下水污染健康风险评价多针对的污染物包括氮素、氟化物、砷、有机物、重金属等,且关于重金属污染的健康风险评价较多。从评价方法来看,大多

学者<sup>[55-60]</sup>采用 US EPA 推荐的健康风险评价模型进行评价,且以饮水摄入评价为主。吴娟娟等<sup>[51]</sup>对松嫩平原浅层地下水中的氮素进行健康风险评价,在利用 US EPA 推荐的评价模型基础上耦合了三角随机理论,降低了污染物质量浓度和模型参数不确定性对评价结果的影响,使评价结果更加客观。Adimalla等<sup>[56]</sup>在评估印度南部尼尔玛尔地下水水质基础上,评价了氟化物和硝酸盐污染对人体的健康危害,结果表明,当地居民面临的健康风险儿童>女性>男性。目前,国内缺乏适合我国实际现状的地下水污染健康风险评价相关的导则、标准、规范,亟待需要完整的健康风险评价体系。

### 2.2.3 地下水污染修复

地下水污染修复技术按照修复方式可以分为异位修复和原位修复。抽出处理技术(Pump & Treat)是典型的异位修复技术,也是最早应用于实例的地下水污染修复方法,但由于成本、二次污染与可处理污染物等限制,应用逐渐减少。随后自然衰减、生物修复、可渗透反应格栅、爆气法等原位修复技术方法逐渐兴起,其具有相对成本低、对环境扰动小等优点<sup>[61-62]</sup>。针对污染场地的特殊性,选出科学有效的修复技术或技术组合,对提高修复效率、节约修复成本具有重要意义。相关学者<sup>[63]</sup>利用层次分析法、多

准则决策分析模型<sup>[64-65]</sup>、IOC 排序法(Importance Order of the Criteria)等<sup>[66]</sup>方法对修复技术的实用性进行计算、筛选和评价,得到最优的修复方案。修复方案实施后,修复效果评估需要客观、科学的评价。廉新颖等<sup>[67]</sup>利用层次分析法建立了地下水污染修复技术验证评价指标体系,并应用于实际案例,结果可评价地下水修复技术的先进性和合理性,为完善修复技术方案提供建议。

国内学者对纳米零价铁修复地下水的相关研究关注较多(表 1)。纳米零价铁首次用于地下水污染修复<sup>[68]</sup>以来,国内对纳米零价铁修复地下水开始持续关注<sup>[69-70]</sup>。高阳阳等<sup>[71]</sup>将鼠李糖脂改性后的纳米铁负载在活性炭上,将其作为室内试验材料,研究了改性纳米零价铁去除地下水中硝态氮的可行性。张永祥等<sup>[72]</sup>利用环境友好型材料羧甲基淀粉钠(CMS)对纳米零价铁材料进行改进后发现,当包覆纳米零价铁中 CMS 比例为 80% 时,2,4-二氯苯酚的去除效果最好,达到 83.69%。零价铁在地下水污染修复中的实际应用主要以两方面为主:一是将零价铁用作可渗透反应格栅的反应材料;二是将零价铁制作成悬浮浆液通过钻孔注入到被污染的含水层。2010 年国内开展了零价铁-释缓碳药剂修复氯代烃类污染地下水的现场中试实验,结果显示:该药剂可使含水层中的 1,2-二氯乙烷、1,1-二氯乙烷和氯仿的去除率达到 99.90%、86.00% 和 98.00%,去除率较高<sup>[73]</sup>。

### 2.3 研究机构

研究机构是学科发展与人才培养的重要载体。

由图 3(a) 得知,2009 年以来中国地质科学院水文地质环境地质研究所是发文量最多的机构,数量为 100 篇,其次是吉林大学、中国地质大学(武汉)、北京师范大学、中国地质大学(北京),发文量分别为 83、63、55、50 篇。由此可知发文量较多的研究机构均是与地下水科学或环境科学相关的科研院所和高校。从地域上看,发文量前十的机构中,北京市位居首位,占 4 所,其次为河北省占 2 所,吉林省占 2 所,湖北省占 1 所,新疆维吾尔自治区 1 所。这些科研机构对我国地下水污染领域的发展起到了主导作用。

图 3(b) 反映出科研机构的国际影响力,中国地质大学(武汉)、中国地质大学(北京)是发文量最大的研究机构,达 225 篇,其次是中国科学院、美国地质调查局(United States Geological Survey)、吉林大学、印度理工学院(Indian Institute of Technology),发文量分别为 201、148、108、69 篇。综合表 3,外文期刊发文量前十的研究机构中中国科研机构占 5 所,且发文量占前十位机构发文总量的 62.4%,这与吉林大学、中国地质大学(北京)、中国地质大学(武汉)等机构的学科优势、团队建设以及单位间的良好合作等因素密不可分。中国相关科研机构发文量约占外文文献发文总量的 1/7,这些机构的雄厚科研实力奠定了我国在地下水污染研究领域的重要国际地位。此外,中国科学院、清华大学、中国科学院大学未进入中文发文量排名前十位,在外文发文量排名较靠前,这也反映出我国顶尖的综合科研机构更注重国际交流和影响力。

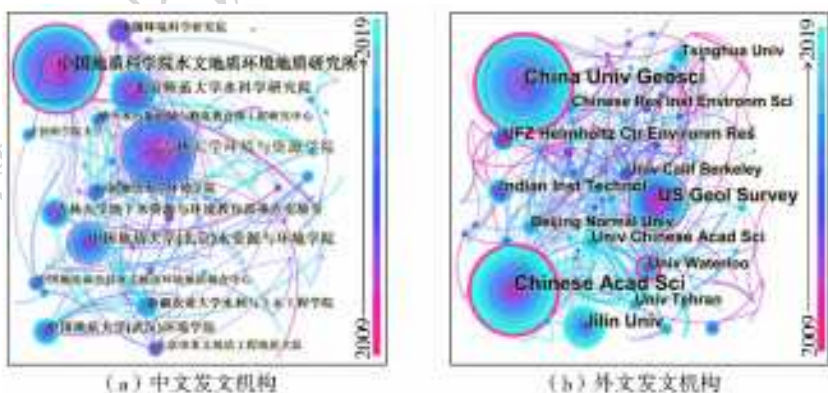


图 3 2009—2019 年中外文文献中地下水污染研究机构发文情况共现图谱

Fig. 3 The co-occurrence map of groundwater pollution research in Chinese and foreign articles from 2009 to 2019

### 2.4 发文作者

中外文文献发文作者网络共现图谱见图 4。由图 4(a) 知:北京师范大学的王金生教授是 2009 年以来中文发文量最多的学者,达 39 篇;其次是滕彦国教授、何江涛教授、周金龙教授和席北斗研究员,发

文量分别为 31、26、24、20 篇。由作者间合作关系知,国内研究主要团队有北京师范大学王金生、滕彦国团队,中国地质科学院水文地质环境地质研究所孙继朝、张兆吉团队,中国地质大学(北京)刘菲、何江涛团队,新疆农业大学周金龙团队,中国环境科学

研究院席北斗团队,吉林大学苏小四、张玉玲团队等,孙继朝、张兆吉、苏小四、张玉玲团队国内发文量主要集中在2009—2013年,王金生、滕彦国、刘菲、何江涛团队发文量主要集中在2012年以后,周金龙团队发文量主要集中在2016年以后,这也反映出国内地下水污染研究团队的变化趋势。此外,随着时间推移,地下水污染研究团队由集中向分散过度,说明我国地下水污染研究团队逐渐呈多元化,这有利于地下水污染领域的发展。研究团队整体呈现团队内部合作紧密,团队间交流相对较少,这种现象在一定程度上不利于学科的发展。

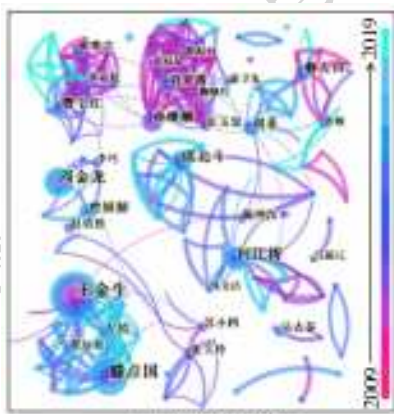
由图4(b)知:中国地质大学(武汉)YANXIN

WANG(王焰新)院士节点直径最大,自2009年以来发文量达65篇;其次是BEIDOU XI与FEI LIU,发文量分别为29篇与21篇。外文发文量前十名的学者中中国占有8席,印度、韩国各一席,见表4。学者发文数量不仅在一定程度上代表着学者个人学术水平和科研能力,也代表着学者所在团队的学术活跃度和国际影响力。以上结果说明,中国学者及研究团队在地下水污染研究领域具有重要的国际学术地位和影响力,特别是王焰新院士团队在地下水污染研究领域的雄厚科研实力极大提高了我国在地下水污染研究领域的国际地位和影响力。

表3 2009—2019年中外文地下水污染发文数量前十的研究机构

Tab. 3 Top 10 research institutions of groundwater pollution publications in Chinese and foreign languages from 2009 to 2019

排名	中文		外文	
	文献发文研究机构	发文量/篇	文献发文研究机构	发文量/篇
1	中国地质科学院水文地质环境地质研究所	100	China University of Geosciences	225
2	吉林大学环境与资源学院	83	Chinese Academy of Science	201
3	中国地质大学(武汉)环境学院	63	United States Geological Survey	148
4	北京师范大学水科学研究院	55	Jilin University	108
5	中国地质大学(北京)水资源与环境学院	50	Indian Institute of Technology	69
6	吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室	40	Helmholtz Centre for Environment Research U FZ	67
7	中国环境科学研究院	28	University of Chinese Academy of Science	57
8	新疆农业大学水利与土木工程学院	28	Tsinghua University	55
9	中国地质调查局水文地质环境地质调查中心	24	University of Waterloo	53
10	北京市水文地质工程地质大队	20	University of California, Berkeley	52



(a) 中文发文件者



(b) 外文发文件者

图4 2009—2019年中外文文献中地下水污染研究相关作者发文情况共现图谱

Fig. 4 The co-occurrence map of groundwater pollution in Chinese and foreign articles by relevant scholars from 2009 to 2019

### 3 结论

(1) 地下水污染研究领域的论文发文量呈连续增加趋势,2014年以后,我国学者更注重学术成果的国际传播和国际影响力,这有利于提升中国在国际学术界的影响力。在《关于规范高等学校SCI

论文相关指标使用 树立正确评价导向的若干意见》指导下,今后中文论文质量和数量极可能得到提升。

(2) 地下水污染研究主要分为3个方向:一是研究典型地下水污染物的来源、迁移转化规律与污染特征等;二是对地下水污染进行水质评价,污染风险

评价与健康风险评价等;三是对地下水污染修复技术及修复方案筛选评价的研究。同时,中文文献中尾矿库、傍河水源地和包气带与外文文献中伊朗(Iran)和美国宾西法尼亚州马塞勒斯(Marcellus)的相关地下水污染问题成为近年来的研究热点。

表4 2009—2019年中外地下水污染发文数量  
前十位作者统计

Tab. 4 Top 10 scholars of groundwater pollution in Chinese and foreign languages from 2009 to 2019

排 名	中文		外文	
	发文学者	发文章/篇	发文学者(国家或地区)	发文章/篇
1	王金生	39	YANXIN WANG(中国)	65
2	滕彦国	31	BEIDOU XI(中国)	29
3	何江涛	26	FEI LIU(中国)	21
4	周金龙	24	C M KAO(中国台湾)	21
5	席北斗	20	WENXI LU(中国)	20
6	孙继朝	18	ELANGO L(印度)	20
7	刘景涛	16	XIANJUN XIE(中国)	18
8	刘菲	16	YANGUO TENG(中国)	17
9	蔡五田	15	CHUANPING FENG(中国)	17
10	曾妍妍	15	KANGKUN LEE(韩国)	16

(3)中国地质科学院水文地质环境地质研究所、吉林大学、中国地质大学(武汉)、北京师范大学和中国地质大学(北京)对我国地下水污染领域的发展起到了主导作用;中国地质大学、中国科学院、美国地质调查局、吉林大学、印度理工学院是极具国际影响力的科研单位,我国科研实力雄厚的研究机构奠定了我国在地下水污染研究领域的国际地位。

(4)地下水污染领域的重要研究者主要集中在与地下水科学或环境科学相关的科研院所和高校,研究团队随时间呈分散式、多元化发展,这有利于我国地下水污染研究领域的发展。中国学者的国际发文章量在一定程度上奠定了研究优势,特别是中国地质大学(武汉)王焰新院士团队在地下水污染研究领域极具国际影响力。

#### 参考文献(References):

[1] 吴爱民,荆继红,宋博. 略论中国水安全问题与地下水的保障作用[J]. 地质学报, 2016, 90(10): 2939-2947. (WU A M, JING J H, SONG B. Water safety issues of China and ensuring roles of groundwater[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(10): 2939-2947. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0001-5717.2016.10.029.

[2] 尹国勋,李振山. 地下水污染与防治[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005: 178-180. (YIN G X, LI Z S. Groundwater pollution and prevention[M]. Beijing: China

Environmental Science Press, 2005: 178-180. (in Chinese))

[3] 李亚松,张兆吉,费宇红,等. 河北省滹沱河冲积平原地下水质量及污染特征研究[J]. 地球学报, 2014, 35(2): 169-176. (LI Y S, ZHANG Z J, FEI Y H, et al. Groundwater quality and contamination characteristics in the Hutuo River plain area, Hebei Province. [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(2): 169-176. (in Chinese))

[4] 王仕琴,郑文波,孔晓乐. 华北农区浅层地下水硝酸盐分布特征及其空间差异性[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 57-63. (WANG S Q, ZHENG W B, KONG X L. Spatial distribution characteristics of nitrate in shallow groundwater of the agricultural area of the north China plain[J]. Chinese Journal of Ecoagriculture, 2018, 26(10): 57-63. (in Chinese)) DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180639.

[5] 钱建平,李伟,张力,等. 地下水中重金属污染来源及研究方法综述[J]. 地球与环境, 2018, 46(6): 104-111. (QIAN J P, LI W, ZHANG L, et al. Source and research status of heavy metal pollution in groundwater[J]. Earth and Environment, 2018, 46(6): 104-111. (in Chinese)) DOI: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2018.46.132.

[6] 刘宏斌,张云贵,李志宏,等. 北京市平原农区深层地下水硝态氮污染状况研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 411-418. (LIU H B, ZHANG Y G, LI Z H, et al. Nitrate contamination of deep groundwater in rural plain areas of Beijing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(3): 411-418. (in Chinese))

[7] 刘菲,王苏明,陈鸿汉. 欧美地下水有机污染调查评价进展[J]. 地质通报, 2010, 29(6): 907-917. (LIU F, WANG S M, CHEN H H. Progress of investigation and evaluation on groundwater organic contaminants in western countries[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(6): 907-917. (in Chinese))

[8] 李军,张翠云,蓝芙宁,等. 区域地下水不同深度微生物群落结构特征[J]. 中国环境科学, 2019, 39(6): 2614-2623. (LI J, ZHANG C Y, LAN F N, et al. Structure characteristics of microbial community at different depths groundwater[J]. China Environmental Science, 2019, 39(6): 2614-2623. (in Chinese)) DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2019.0311.

[9] 张新钰,辛宝东,王晓红,等. 我国地下水污染研究进展[J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 415-422. (ZHANG X Y, XIN B D, WANG X H, et al. Progress in research on groundwater pollution in our country[J]. Earth and Environment, 2011, 39(3): 415-422. (in Chinese))

[10] ZHAI Y, LEI Y, WU J, et al. Does the groundwater nitrate pollution in China pose a risk to human health?: A critical review of published data[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2017, 24(4): 3640-3653. DOI: 10.1007/s11356-016-8088-9.

[11] 蒲生彦,马晋,杨庆,等. 地下水污染预警指标体系构

- 建方法研究进展[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(3): 191-197. (PU S Y, MA J, YANG Q, et al. A review on construction methods for index system of early warning of groundwater pollution [J]. Environment Science & Technology, 2019, 42(3): 191-197. (in Chinese)) DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.2019.03.027.
- [12] CHEN C. Searching for intellectual turning points: Progressive knowledge domain visualization[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 2004, 101(suppl): 5303-5310.
- [13] CHEN C. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. Journal of the American Society for Information Science & Technology, 2006, 57(3): 359-377.
- [14] CHEN C, IBEKWE SANJUAN F, HOU J. The structure and dynamics of cocitation clusters: A multiple perspective cocitation analysis [J]. Journal of the American Society for Information Science & Technology, 2010, 61(7): 1386-1409.
- [15] CHEN C, HU Z, LIU S, et al. Emerging trends in regenerative medicine: A scientometric analysis in CiteSpace[J]. Expert Opinion Biological Therapy, 2012, 12(5): 593-608.
- [16] ZHANG S, MAO G, CRITTENDEN J, et al. Groundwater remediation from the past to the future: A bibliometric analysis[J]. Water Research, 2017, 119: 114-125. DOI: 10.1016/j.watres.2017.01.029.
- [17] LIU Z, YANG J, ZHANG J, et al. A bibliometric analysis of research on acid rain [J]. Sustainability, 2019, 11(11): 3077. DOI: 10.3390/su1113077.
- [18] 李军, 张恒星, 蓝芙宁. 基于文献计量学的中国地下水微生物研究现状分析[J]. 人民长江, 2019, 50(9): 54-59, 123. (LI J, ZHANG H X, LAN F N. Research progress of domestic groundwater microorganism based on bibliometrics analysis [J]. Yangtze River, 2019, 50(9): 54-59, 123. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.09.010.
- [19] 孙威, 毛凌潇. 基于 CiteSpace 方法的京津冀协同发展研究演化[J]. 地理学报, 2018, 73(12): 2378-2391. (SUN W, MAO L X. Evolution of research on Beijing Tianjin Hebei cooperative development based on CiteSpace method [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(12): 2378-2391. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlxb201812008.
- [20] 李强. 基于文献计量学分析 2016 年度岩溶学研究热点[J]. 地球科学进展, 2017, 32(5): 535-545. (LI Q. Research hotspots of karst in 2016 based on bibliometrics analysis [J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(5): 535-545. (in Chinese)) DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2017.05.0535.
- [21] 陈华, 杨阳, 王伟. 基于文献计量分析我国生态水文学研究现状及热点[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 769-775. (CHEN H, YANG Y, WANG W. The ecohydrology in China analyzed based on bibliometric: Domestic research status and hot spots [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 769-775. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2016.0086.
- [22] 方良, 周书葵, 刘迎九, 等. 铀尾矿库地下水污染风险评价方法研究[J]. 环境工程, 2016, 34(1): 100-102, 134. (FANG L, ZHOU S K, LIU Y J, et al. Study on groundwater pollution risk assessment method in uranium tailings pond [J]. 2016, 34(1): 100-102, 134. (in Chinese)) DOI: 10.13205/j.hjgc.201601022.
- [23] 钱伟, 王玮, 任宇泽, 等. 甘肃格宏道金矿尾矿库污染物运移规律[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 78-83. (QIAN W, WANG W, REN Y Z, et al. Contaminant transportation characteristics of Gehongdao gold mine tailing dam in Gansu Province [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 78-83. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2016.03.014.
- [24] 张连凯, 覃小群, 黄奇波, 等. 岩溶区矿山污染地下水的生植物修复初步研究[J]. 中国岩溶, 2017, 36(5): 743-750. (ZHANG L K, QIN X Q, HUANG Q B, et al. Aquatic plants bioremediation to groundwater contaminated by mines in karst areas [J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(5): 743-750. (in Chinese)) DOI: 10.11932/karst2017y47.
- [25] 王嘉慧, 张雪峰, 王建英, 等. 基于综合生物标志物响应指数法的尾矿库污染程度评价研究[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(8): 64-69, 74. (WANG J H, ZHANG X F, WANG J Y, et al. Pollution assessment in the tailings using integrated biomarker response index [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2015, 37(8): 64-69, 74. (in Chinese))
- [26] 高翔, 左锐, 郭学茹, 等. 基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4086-4095. (GAO X, ZUO R, GUO X R, et al. Seasonal variation characteristics of pollution risk in a riverside source area based on source apportionment [J]. Environmental Science, 2018, 39(9): 4086-4095. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjlx.201801275.
- [27] 杜青青, 尹芝华, 左锐, 等. 某污染场地氨氮迁移过程模拟研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4585-4595. (DU Q Q, YIN Z H, ZUO R, et al. Migration process simulation of ammonia nitrogen in contaminated site [J]. China Environmental Science, 2017, 37(12): 4585-4595. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2017.12.023.
- [28] 董佩, 李阳, 孙颖, 等. 包气带黏性土层对氮素污染地下水的防污性能试验研究[J]. 现代地质, 2016, 30(3): 688-694. (DONG P, LI Y, SUN Y, et al. Experimental study on the filtration capability of clayey soils in the vadose zone prevention nitrogen from polluting groundwater [J]. Geoscience, 2016, 30(3): 688-694. (in Chinese))



- DOI: 10.3969/j.issn.1000-8527.2016.03.020.
- [29] RAHMATI O, SAMANIA N, MAHMOODI N, et al. Assessment of the contribution of N-fertilizers to nitrate pollution of groundwater in western Iran (case study: Ghorveh Dehgelan aquifer) [J]. *Water Quality, Exposure and Health*, 2015, 7(2): 143-151.
- [30] MIRZABEYGI M, YOUSEFI M, SOLEIMANI H, et al. The concentration data of fluoride and health risk assessment in drinking water in the Ardakan City of Yazd Province, Iran [J]. *Data in Brief*, 2018, 18: 40-46. DOI: 10.1016/j.dib.2018.02.069.
- [31] RADFARD M M, YUNESIAN M, NODEHI R N, et al. Drinking water quality and arsenic health risk assessment in Sistan and Baluchestan, southeastern province, Iran [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2019, 25(4): 949-965. DOI: 10.1080/10807039.2018.1458210.
- [32] BARTH-NAFTILAN E, SOHNG J, SAIERS J E. Methane in groundwater before, during, and after hydraulic fracturing of the Marcellus Shale [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(27): 6970-6975. DOI: 10.1073/pnas.1720898115.
- [33] LLEWELLYN G T, DORMAN F, WESTLAND J L, et al. Evaluating a groundwater supply contamination incident attributed to Marcellus Shale gas development [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(20): 6325-6330.
- [34] 王仕琴, 郑文波, 孔晓乐. 华北农区浅层地下水硝酸盐分布特征及其空间差异性 [J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(10): 1476-1482. (WANG S Q, ZHENG W B, KONG X L. Spatial distribution characteristics of nitrate in shallow groundwater of the agricultural area of the north China plain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(10): 1476-1482 (in Chinese)) DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180639.
- [35] KOHL D H, SHEARER B G, COMMONER B. Fertilizer nitrogen: Contribution to nitrate in surface water in a corn belt watershed [J]. *Science*, 1971, 174(4016): 1331-1334.
- [36] 邵益生, 纪彬. 应用氮同位素方法研究污灌对地下水氮污染的影响 [J]. *工程勘察*, 1992(4): 37-41. (SHAO Y S, JI B. Study on the effect of sewage irrigation on groundwater nitrogen pollution by nitrogen isotope method [J]. *Geotechnical Investigation and Surveying* 1992(4): 37-41. (in Chinese))
- [37] MUELLER N D, GERBER J S, JOHNSTON M, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management [J]. *Nature*, 2012, 490(7419): 254-257.
- [38] WARD H M, DEKOK T M, LEVALLOIS P, et al. Workgroup report: Drinking water nitrate and health: recent findings and research needs [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2005(113): 1607-1614.
- [39] WIDORY D, PETELET-GIRAUD E, NEGREL P, et al. Tracking the sources of nitrate in groundwater using coupled nitrogen and boron isotopes: A synthesis [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(2): 539-548.
- [40] UREY H C. The thermodynamic properties of isotopic substances [J]. *Journal of Chemical Society*, 1947: 562-581.
- [41] 卢丽, 李文莉, 裴建国, 等. 基于 IsoSource 的桂林寨底地下河硝酸盐来源定量研究 [J]. *地球学报*. 2014, 35(2): 248-254. (LU L, LI W L, PEI J G, et al. A quantitative study of the sources of nitrate of Zhaidi underground river in Guilin based on IsoSource [J]. *Acta Geoscientica Sinica*. 2014, 35(2): 248-254. (in Chinese))
- [42] MATIATOS I. Nitrate source identification in groundwater of multiple land use areas by combining isotopes and multivariate statistical analysis: A case study of Asopos basin (Central Greece) [J]. *Science of the Total Environment*. 2016, 541: 802-814. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.134.
- [43] KIM H, KAOWN D, MAYER B, et al. Identifying the sources of nitrate contamination of groundwater in an agriculture area (Haeon basin, Korea) using isotope and microbial community analyses [J]. *Science of the Total Environment*. 2015, 533: 566-575.
- [44] 鲁垠涛, 刘芳, 姚宏, 等. 北京密云水库小流域地下水硝酸盐污染来源示踪 [J]. *环境化学*. 2016, 35(1): 180-188. (LU Y T, LIU F, YAO H, et al. Source analysis of nitrate pollution source in groundwater in a small watershed of Miyun reservoir in Beijing [J]. *Environmental Chemistry*. 2016, 35(1): 180-188. (in Chinese)) DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016.01.2015052501.
- [45] ZHANG Q Q, SUN J Z, LIU J T et al. Driving mechanism and sources of groundwater nitrate contamination in the rapidly urbanized region of south China [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2015, 182: 221-230.
- [46] 张翠云, 张胜, 马琳娜, 等. 污灌区地下水硝酸盐污染来源的氮同位素示踪 [J]. *地球科学(中国地质大学学报)*. 2012, 37(2): 350-356. (ZHANG C Y, ZHANG S, MA L N, et al. Nitrogen isotope tracing of sources of nitrate contamination in groundwater from wastewater irrigated area [J]. *Earth Science Journal of China University of Geosciences*. 2012, 37(2): 350-356. (in Chinese))
- [47] PHILLIPS D L, KOCH P L. Incorporating concentration dependence in stable isotope mixing models [J]. *Oecologia*. 2002, 130(1): 114-125.
- [48] PHILLIPS D L, NEWSOME S D, GREGG J W. Combining sources in stable isotope mixing models: alternative methods [J]. *Oecologia*, 2005, 144(4): 520-527.
- [49] 方运海, 郑西来, 彭辉, 等. 基于模糊综合优化模型的

- 地下水质量评价[J]. 地学前缘, 2019, 26(4): 301-306. (FANG Y H, ZHENG X L, PENG H, et al. Groundwater quality assessment based on optimization of fuzzy synthetic evaluation[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(4): 301-306. (in Chinese)) DOI: 10.13745/j.esf.sf.2019.5.27.
- [50] 郇环, 廉新颖, 杨昱, 等. 基于级别差法的地下水水质评价方法筛选技术研究[J]. 环境科学研究, 2020, 33(2): 402-410. (XUN H, LIAN X Y, YANG Y, et al. Study on screening method for groundwater quality assessment based on level difference method[J]. Research of Environmental Science, 2020, 33(2): 402-410. (in Chinese)) DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2019.06.19.
- [51] 杨彦, 于云江, 王宗庆, 等. 区域地下水污染风险评价方法研究[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 653-661. (YANG Y, YU Y J, WANG Z Q, et al. Study on the risk assessment method of regional groundwater pollution[J]. Environmental Science, 2013, 34(2): 653-661. (in Chinese))
- [52] LIANG J, LI Z, YANG Q, et al. Specific vulnerability assessment of nitrate in shallow groundwater with an improved DRSTIG-LE model[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 174: 649-657.
- [53] NESHAT A, PRADHAN B. An integrated DRASTIC model using frequency ratio and two new hybrid methods for groundwater vulnerability assessment[J]. Natural Hazards, 2015, 76(1): 543-563.
- [54] 左锐, 陈敏华, 李仙波, 等. 基于“生态水位-水质-水源地”协同作用的地下水环境风险评价方法研究[J]. 环境科学研究, 2019, 32(8): 1275-1283. (ZUO R, CHEN M H, LI X B, et al. Environmental risk assessment of groundwater based on comprehensive effects of ‘ecological groundwater level quality source area’[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(8): 1275-1283. (in Chinese)) DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2019.01.19.
- [55] 吴娟娟, 卞建民, 万罕立, 等. 松嫩平原地下水氮污染健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3493-3500. (WU J J, BIAN J M, WAN H L, et al. Health risk assessment of groundwater nitrogen pollution in Songnen plain[J]. China Environmental Science, 2019, 39(8): 3493-3500. (in Chinese)) DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2019.0415.
- [56] ADIMALLA N, LI P, HUI Q. Evaluation of groundwater contamination for fluoride and nitrate in semi arid region of Nirmal province, south India: A special emphasis on human health risk assessment (HHRA)[J]. Human & Ecological Risk Assessment, 2019, 25(5): 1107-1124. DOI: 10.1080/10807039.2018.1460579.
- [57] 邓安琪, 董兆敏, 高群, 等. 中国地下水砷健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2017, 37(9): 3556-3565. (DENG A Q, DONG Z M, GAO Q, et al. Health risk assessment of arsenic in groundwater across China[J]. China Environmental Science, 2017, 37(9): 3556-3565 (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2017.09.044.
- [58] 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 等. 崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 185-195. (ZHOU J M, JIANG Z C, XU G L, et al. Water quality analysis and health risk assessment in groundwater at Xiangshui, Chongzuo[J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2675-2685. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjcx.201810234.
- [59] 高瑞忠, 秦子元, 张生, 等. 吉林泰盐湖盆地地下水 Cr、As、Hg 健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2018, 38(6): 2353-2362. (GAO R Z, QIN Z Y, ZHANG S, et al. Health risk assessment of Cr, As and Hg in groundwater of Jilantai salt lake basin, China[J]. China Environmental Science, 2018, 38(6): 2353-2362. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2018.06.040.
- [60] 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 等. 北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 120-125. (CHEN W P, PENG C W, YANG Y, et al. Health risk evaluation of organochlorine and organophosphorus pesticides in groundwater in Beijing[J]. Environment Science, 2018, 39(1): 120-125. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjcx.201705130.
- [61] 李恒震, 胡黎明, 辛鸿博. 微纳米气泡技术应用于污染地下水原位修复研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S2): 115-120. (LI H Z, HU L M, LI H B. Application of micro nano bubble technology in remediation of polluted groundwater[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S2): 115-120 (in Chinese))
- [62] 李元杰, 王森杰, 张敏, 等. 土壤和地下水污染的监控自然衰减修复技术研究进展[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 1185-1193. (LI Y J, WANG S J, ZHANG M, et al. Research progress of monitored natural attenuation remediation technology for soil and groundwater pollution[J]. China Environmental Science, 2018, 38(3): 1185-1193. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2018.03.047.
- [63] 鄂佳楠, 周睿, 郑旭, 等. 基于蒙特卡罗法和层次分析法的污染场地地下水修复技术筛选方法研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(5): 499-503, 509. (E J N, ZHOU R, ZHENG X, et al. Screening method for groundwater remediation technology of contaminated sites based on MC and AHP[J]. Environmental Pollution and Control, 2017, 39(5): 499-503, 509. (in Chinese)) DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2017.05.008.
- [64] 张士宽, 王月, 安达, 等. 垃圾填埋场地下水污染修复技术优选研究[J]. 环境工程技术学报, 2017, 7(4): 463-469. (ZHANG S K, WANG Y, AN D, et al. Remediation technology optimization for groundwater contamination of municipal solid waste landfill[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2017, 7(4): 463-469. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.

- issn. 1674 991X. 2017. 04. 063.
- [65] AN D, XI B, REN J, et al. Sustainability assessment of groundwater remediation technologies based on multi criteria decision making method[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2016: S0921344916301951. DOI: 10. 1016/j. resconrec. 2016. 08. 002.
- [66] 靳超, 左锐, 王金生, 等. 傍河污染场地地下水修复技术筛选[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(6): 689-697. (JIN C, ZUO R, WANG J S, et al. Screening groundwater remediation technology for riverbank pollution sites[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2017, 53(6): 689-697. (in Chinese)) DOI: 10. 16360/j. cnki. jbnuns. 2017. 06. 010.
- [67] 廉新颖, 杨昱, 席北斗, 等. 地下水污染修复技术验证评价方法研究[J]. 环境科学研究, 2018, 31(10): 1743-1750. (LIAN X Y, YANG Y, XI B D, et al. Developing a verification method for groundwater contamination remediation technologies[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(10): 1743-1750. (in Chinese)) DOI: 10. 13198/j. issn. 1001-6929. 2018. 07. 02.
- [68] ELLIOTT D W, ZHANG W X. Field assessment of nanoscale bimetallic particles for groundwater treatment[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(24): 4922-4926.
- [69] 韩占涛, 吕晓立, 张威, 等. 纳米零价铁地下水修复技术的最新研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 41-47. (HAN Z T, LV X L, ZHANG W, et al. Groundwater remediation technology of nanoscale zero valent iron particles[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(1): 41-47. (in Chinese))
- [70] 郑西来, 唐凤琳, 辛佳, 等. 污染地下水零价铁原位反应带修复技术: 理论·应用·展望[J]. 环境科学研究, 2016, 29(2): 155-163. (ZHENG X L, TANG F L, XIN J, et al. Development of a zero valent iron based in situ reactive zones technique for remediation of contaminated groundwater[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(2): 155-163. (in Chinese)) DOI: 10. 13198/j. issn. 1001-6929. 2016. 02. 01.
- [71] 高阳阳, 刘国, 陈春梅, 等. 改性纳米铁/炭填充 PRB 去除地下水硝态氮研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(10): 3019-3025. (GAO Y Y, LIU G, CHEN C M, et al. SM nano iron/carbon filling in PRB for nitrate nitrogen removal in groundwater[J]. China Environmental Science, 2016, 36(10): 3019-3025. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6923. 2016. 10. 026.
- [72] 张永祥, 常杉, 李飞, 等. 稳定型纳米零价铁去除地下水中 2,4-二氯苯酚[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2385-2392. (ZHANG Y X, CHANG S, LI F, et al. Removal of 2,4-dichlorophenol in underground water by stabilized nano zero valent iron[J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2385-2392. (in Chinese)) DOI: 10. 13227/j. hjkx. 201609254.
- [73] 李书鹏, 刘鹏, 杜晓明, 等. 采用零价铁缓释碳修复氯代烃污染地下水的中试研究[J]. 环境工程, 2013, 31(4): 53-58. (LI S P, LIU P, DU X M, et al. A field pilot test for restoring chlorohydrocarbon contaminated groundwater using ZVI & controlled releasing carbon material[J]. Environmental Engineering, 2013, 31(4): 53-58. (in Chinese))

### Research status of groundwater pollution based on bibliometrics

XIE Hao<sup>1</sup>, LI Jun<sup>2</sup>, ZOU Shengzhang<sup>1</sup>, LIANG Yongping<sup>1</sup>, SHEN Haoyong<sup>1</sup>, ZHOU Changsong<sup>1</sup>

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences / Key Laboratory of Karst Dynamic, MNR&GZAR, Guilin 541004, China; 2. Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China)

**Abstract:** To understand the research status and key points in the field of groundwater pollution at home and abroad, 8 117 high quality pieces of literature in the field of groundwater pollution were collected from academic journals from 2009 to 2019, and the scientific knowledge map was drawn by the visualization software CiteSpace V. 5. 6. R3. Through the statistics, clustering, and visualization of the paper volume, research content, research institutions, and authors of groundwater research, the overall situation of groundwater pollution research is explored in multiple dimensions. The results show that: the total amount of scientific research papers in the field of groundwater pollution research is increasing, the research focuses on three aspects: pollutant characteristics, pollution evaluation, and pollution remediation, nitrate and arsenic pollution has become the research focus of groundwater pollution; the Institute of Hydrogeology and Environmental Geology of the Chinese Academy of Geological Sciences and Jilin University have made important contributions to the development of domestic groundwater pollution, and the research team has developed decentralized and diversified over time; China University of Geosciences, Chinese Academy of Sciences, and USGS are the most influential institutions in the world. Wang Yanxin's team of academicians from China University of Geosciences (Wuhan) has great international influence in the field of groundwater pollution research. Under the demand of ecological civilization construction in China, the transformation of groundwater pollution remediation from theoretical research to the application of contaminated sites is still the current research trend.

**Key words:** groundwater; pollution; nitrate; bibliometrics; research status