

地下水硝酸盐污染研究热点与趋势分析

刘玉莲, 李捷, 姜颖, 焦璇, 谢宇熙

Analysis of research hotspots and trends in groundwater nitrate contamination

LIU Yulian, LI Jie, JIANG Ying, JIAO Xuan, and XIE Yuxi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311027>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北京西山岩溶水中硝酸盐来源及迁移特征

Sources and migration of nitrate in groundwater in the Xishan karst aquifer in Beijing

李露, 秦大军, 郭艺, 孙杰 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 73–80

地下水位波动带三氮迁移转化过程研究进展

Advances in researches on ammonia, nitrite and nitrate on migration and transformation in the groundwater level fluctuation zone

刘鑫, 左锐, 王金生, 何柱锬, 李桥 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 27–36

全国地下水质分布及变化特征

Distribution and evolution characteristics of national groundwater quality from 2013 to 2017

李圣品, 李文鹏, 殷秀兰, 金爱芳 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 1–8

塔城盆地地下水“三氮”污染特征及成因

Distribution and source of nitrogen pollution in groundwater in the Tacheng Basin

吕晓立, 刘景涛, 周冰, 朱亮 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 42–42

乙醇对过硫酸盐氧化地下水中苯系物的影响

Effect of ethanol on persulfate oxidation of BTEX in groundwater

韦延梅, 陈余道, 吴圣华, 孟伟 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 142–148

地下水氮循环与砷迁移转化耦合的研究现状和趋势

Research status and trend of coupling between nitrogen cycle and arsenic migration and transformation in groundwater systems

郭华明, 高志鹏, 修伟 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 153–163



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311027

刘玉莲, 李捷, 姜颖, 等. 地下水硝酸盐污染研究热点与趋势分析[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(5): 221-230.

LIU Yulian, LI Jie, JIANG Ying, et al. Analysis of research hotspots and trends in groundwater nitrate contamination[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 221-230.

地下水硝酸盐污染研究热点与趋势分析

刘玉莲^{1,2}, 李捷^{1,2}, 姜颖^{1,2}, 焦璇^{1,2}, 谢宇熙^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;

2. 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要: 地下水硝酸盐污染是世界性水环境问题, 目前该领域的阶段性总结分析研究仍然较少。文章选取 1968—2022 年 Web of Science 核心数据库中收录的地下水硝酸盐污染领域相关英文核心期刊发表的 14 407 篇论文作为样本数据, 采用文献计量学中定量研究与定性分析的信息分析方法, 基于知识图谱的结构性和时间性指标, 以 VOS viewer 信息分析软件为支撑工具, 对地下水硝酸盐污染领域研究的发展趋势与当前热点进行梳理。研究结果表明: (1) 该领域发文量呈指数上升, 发文期刊主要集中在环境科学类和水资源类, 表明硝酸盐污染研究在环境与水资源领域占有重要地位; (2) 发文机构统计结果显示, 按机构发文量排序, 前 10 位中美国和中国机构的发文量占发文总量的一半以上; (3) 该领域主要研究的 4 个方向可以概括为溯源、迁移转化机理、污染修复和风险评估, 其中污染修复的关键词最多; (4) 1990—2014 年期间研究的热点集中于溯源与迁移转化机理, 但是具体内容有所区别: 1990—1998 年侧重于硝酸盐污染源的识别, 1999—2014 年侧重于硝酸盐污染源识别方法的研究, 其中同位素和模型模拟技术被突出显示, 2015—2022 年研究的热点集中在污染风险评估上。以上文献计量学分析结果较客观地展现了地下水硝酸盐污染领域的研究热点与趋势, 可为该领域后续的研究与管理工作提供一定的参考。

关键词: 地下水; 硝酸盐污染; 文献计量学; VOS viewer; Web of Science

中图分类号: X141

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)05-0221-10

Analysis of research hotspots and trends in groundwater nitrate contamination

LIU Yulian^{1,2}, LI Jie^{1,2}, JIANG Ying^{1,2}, JIAO Xuan^{1,2}, XIE Yuxi^{1,2}

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation, Ministry of Education, Beijing 100875, China)

Abstract: Groundwater nitrate contamination is a worldwide water environment problem with few phased summaries in this field. Here, 14 407 articles were selected from the Web of Science database for the years 1968—2022 to analyze the development trends and current hotspots in the field of groundwater nitrate contamination research with bibliometric visualization analysis software (VOS viewer). The results showed that: (1) The number of relevant publications has been exponentially increasing. The published journals are mainly related to environmental science and water resources, indicating an important role in this field. (2) The results from the publication institutions and funding institutions show that more than half of the total number of articles from the top ten publication institutions and funding institutions are from the United States and China. (3) The

收稿日期: 2023-11-14; 修订日期: 2024-01-02

投稿网址: www.swdgcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42377058); 国际原子能机构 CRP 项目(F31006)

第一作者: 刘玉莲(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文地质学研究。E-mail: liuyulian0509@163.com

通讯作者: 李捷(1988—), 女, 博士, 副教授, 主要从事同位素水文学研究。E-mail: lijie_lm@163.com

main issues in groundwater nitrate contamination research can be summarized as four subsets: source tracing, migration and transformation mechanisms, pollution remediation, and risk assessment. Among them, pollution remediation has the most keywords, demonstrating the importance of this research area. (4) From 1990 to 2014, the research hotspots in groundwater nitrate research were mainly focused on source tracing and migration and transformation mechanisms. Specifically, the main topic was the identification of nitrate pollution sources during the stage from 1990 to 1998, while the focus shifted to the methods for identifying nitrate pollution sources from 1999 to 2014, with isotopes and models being particularly effective. For the recent stage from 2015 to 2022, the research hotspots have shifted to risk assessment. The bibliometric analysis results in the field of groundwater nitrate pollution can provide some reference for the direction of this field.

Keywords: groundwater; nitrate pollution; bibliometrics; VOS viewer; Web of Science

联合国《世界水发展报告 2022》第一次聚焦于地下水主题:“地下水:变不可见为可见”(Groundwater: Making the invisible visible)^[1]。地下水循环更新慢,地下水污染具有隐蔽性和滞后性,一旦受到某些物质污染则难以处理,硝酸盐即为其中一种^[2-4]。世界卫生组织(WHO)制定的关于饮用水的相关卫生标准中规定,饮用水中 NO_3^- -N 的最大允许质量浓度为 10 mg/L^[5];我国《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)则规定Ⅲ类水质标准中 NO_3^- -N 质量浓度限值为 20 mg/L^[6]。地下水硝酸盐污染不仅仅危害生态环境、破坏生态系统,也能对人体健康产生威胁,饮用硝酸盐超标的地下水会增加患高铁血红蛋白血症、糖尿病、甲状腺疾病等疾病的风险^[7-9]。

地下水硝酸盐污染长期以来一直是水文地质学研究的热点和难点,相关论文越来越多,涉及的主题包括但不限于地下水硝酸盐污染的转化过程与机理、地下水硝酸盐污染来源、地下水硝酸盐污染去除与人体健康风险评估等等。系统梳理地下水硝酸盐污染领域研究的重点与热点,有助于保障地下水安全,进而实现人与自然和谐共生。例如,陈建耀教授等^[4]梳理过 20 世纪 90 年代末到 21 世纪初发表的国内外文献近 500 篇,总结出该阶段国内外地下水硝酸盐污染研究主要集中在地下水硝酸盐污染的过程与机理,涉及污染形式和来源的分析、污染防治措施的探讨。近年来,有学者分别针对硝酸盐污染来源^[10-11]、风险评估^[12]及硝酸盐去除^[13]等不同主题做了综述性的总结。以上工作都推动了污染溯源、危害评估及治理技术的发展,为后续的研究与管理提供了宝贵的参考,但这些工作更多的是聚焦到特定时间段的特定主题上,缺少对更长时间范围内这一领域不同主题的趋势总结和半定量化评价。

文献计量学是探索和分析大量科学数据的一种普遍而严格的方法,能够通过词频分析揭示特定领域

在一定时间内的重点、热点和发展趋势^[14-16]。本文利用文献计量学的数学与统计方法,定量分析了 Web of Science 核心数据库中收录的地下水硝酸盐污染研究领域的 14 407 篇文献^[17]。考虑到该领域中文文献检索出的数量相较于 Web of Science 文献数量来说相对较少,研究规律不明显,另外,Web of Science 作为全球学术信息的重要数据库,收录了大量国内外学者发表的文献,研究结果与中文文献研究结果基本相似,因此在本篇文章中以 Web of Science 的文献分析结果作为代表。时间范围从 1968 年检索到第一篇地下水硝酸盐污染研究领域的文章至 2022 年。对该领域的研究内容和热点进行可视化分析,系统梳理了地下水硝酸盐污染领域研究现状,揭示了发展趋势,分析结果可为该领域深入研究提供参考^[18]。

1 数据来源及研究方法

1.1 数据来源

根据布拉德福定律,核心期刊集中了学科研究领域的核心文献^[19]。本文的研究领域为地下水硝酸盐污染。所有文献数据来源于全球学术信息的重要数据库 Web of Science 核心数据库,数据检索时间跨度为 1968—2022 年,检索策略为:((((TS=(nitrate)) OR TS=(NO_3^- -N)) OR TS=(NO_3^-)))AND TS=(groundwater))。限制文献类型为“Article”,筛选出与地下水硝酸盐污染主题有关的文献共计 14 407 条记录。

1.2 研究方法

本文首先使用 Excel 软件对国家、研究机构、基金机构和期刊等的发文量进行基础统计。由于各个国家及个人语言使用习惯的不同,用词均有差异,在软件可视化分析之前,对基础数据进行人工校准以满足文献分析的要求。

可视化分析使用荷兰莱登大学科学技术研究中心开发的 VOS viewer 软件以及可视化工具 Pajek 完成^[20]。

运行 VOS viewer 软件对处理过的 14 407 篇文献进行可视化分析, 设置阈值为 50, 得到关键词共现图^[21]。聚类分析是利用聚类统计学的方法, 把联系紧密的关键词聚类成类团, 在本研究中运用 VOS viewer 软件根据文献之间的相似度, 计算出每组文献的相似度矩阵, 根据相似度矩阵, 使用聚类算法, 使得每组文献的相似度尽可能高。最后, 使用可视化技术, 将文献分

组, 以便更好地理解文献之间的关系。

叠置分析用于讨论部分与整体的关系。关键词贡献度, 即部分时间段关键词出现的频次与整体时间段关键词频次的比率, 通过对比关键词贡献度揭示特定时间段的研究热点。地下水硝酸盐污染研究领域的知识量化分析流程如图 1 所示。

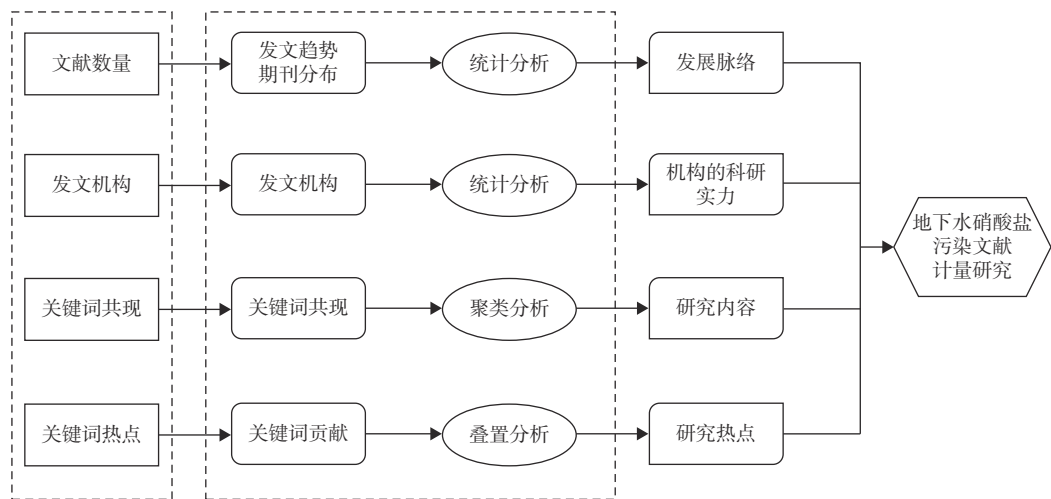


图 1 地下水硝酸盐污染领域的知识量化分析流程图

Fig. 1 Flow chart of bibliometric analysis of groundwater nitrate contamination

2 研究结果及分析

2.1 文献数量特征及发文国家分析

论文发表数量可以反映一个研究领域的热点及发展脉络^[14]。从论文发表趋势来看, 按照年份分布(图 2), 1968—2022 年地下水硝酸盐污染研究领域相关文献量总体呈现逐年增加趋势, 但在 1990 年以前论文发表量处于较低水平, 年均发文量仅为 4 篇, 这一阶段是研究的初级阶段, 主要关注点为地下水硝酸盐污染的来源。到 20 世纪 90 年代由于硝酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 测试技术的成功应用, 学者们开始对硝酸盐溯源与转换机理进行更深层次的研究, 因此相关领域文献数量呈现稳步上升趋势。从论文产出的角度看, 发文量排名前 5 的国家中, 最早开始相关研究且发文最多的国家为美国, 发文 3 832 篇, 表明美国在该领域的研究占据重要地位, 在理论和研究创新上发挥过重要作用, 影响深远。中国起步相对较晚, 但发展速度较快, 总发文量位居第 2, 发文 2 723 篇。2016 年开始, 中国发文量超过了美国, 并在之后的 6 年里稳步增长, 从中可以看出中国对地下水硝酸盐污染问题的重视程度。具体来看, 发文量前 5 名的国家依次为: 美国(3 832 篇, 26.6%)、中国(2 723 篇, 18.9%)、印度(1 099 篇, 7.6%)、

德国(890 篇, 6.2%)、英国(688 篇, 4.8%), 5 国发文量合计占总发文量的 64.1%。

2.2 学科与期刊分析

地下水硝酸盐污染研究领域的发文期刊有 1 348 种, 主要涉及到环境科学、水资源、地理科学综合、工程环境等相关学科。由此可以看出地下水硝酸盐污染研究的发展不单单围绕水资源污染主题, 而是呈现出多元化的交叉学科发展趋势。按照发文数量, 选取前 30 名的期刊(图 3), 分析期刊的学科、发文数量及分区。其中 *Science of the Total Environment* 发文量最多(687 篇), 其次是 *Environmental Earth Sciences*(528 篇)、*Journal of Hydrology*(477 篇)、*Environmental Science Technology*(350 篇)、*Journal of Environmental Quality*(303 篇)等, 前 30 名期刊的平均影响因子为 5.97(2022 年数据)。发文期刊中影响因子最高的期刊为 *Chemical Engineering Journal*(影响因子为 15.10, 2022 年数据)。从期刊分区来看, 属于中国科学院分区 1 区和 2 区期刊的发文量总占比为 53%, 表明硝酸盐污染研究在环境与水资源研究领域占有重要地位。

2.3 发文机构分析

基于全球发文机构分析, 发文量位于世界前 5 的机构是中国科学院(Chinese Academy of Sciences, 492

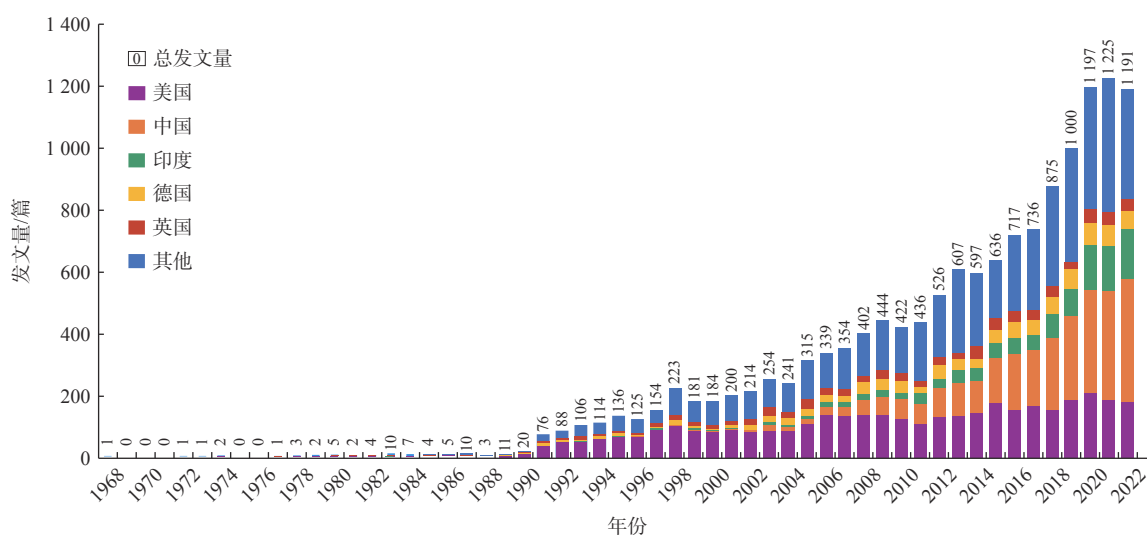


图 2 1968—2022 年发文量趋势图

Fig. 2 Trend chart of publication volume from 1968 to 2022

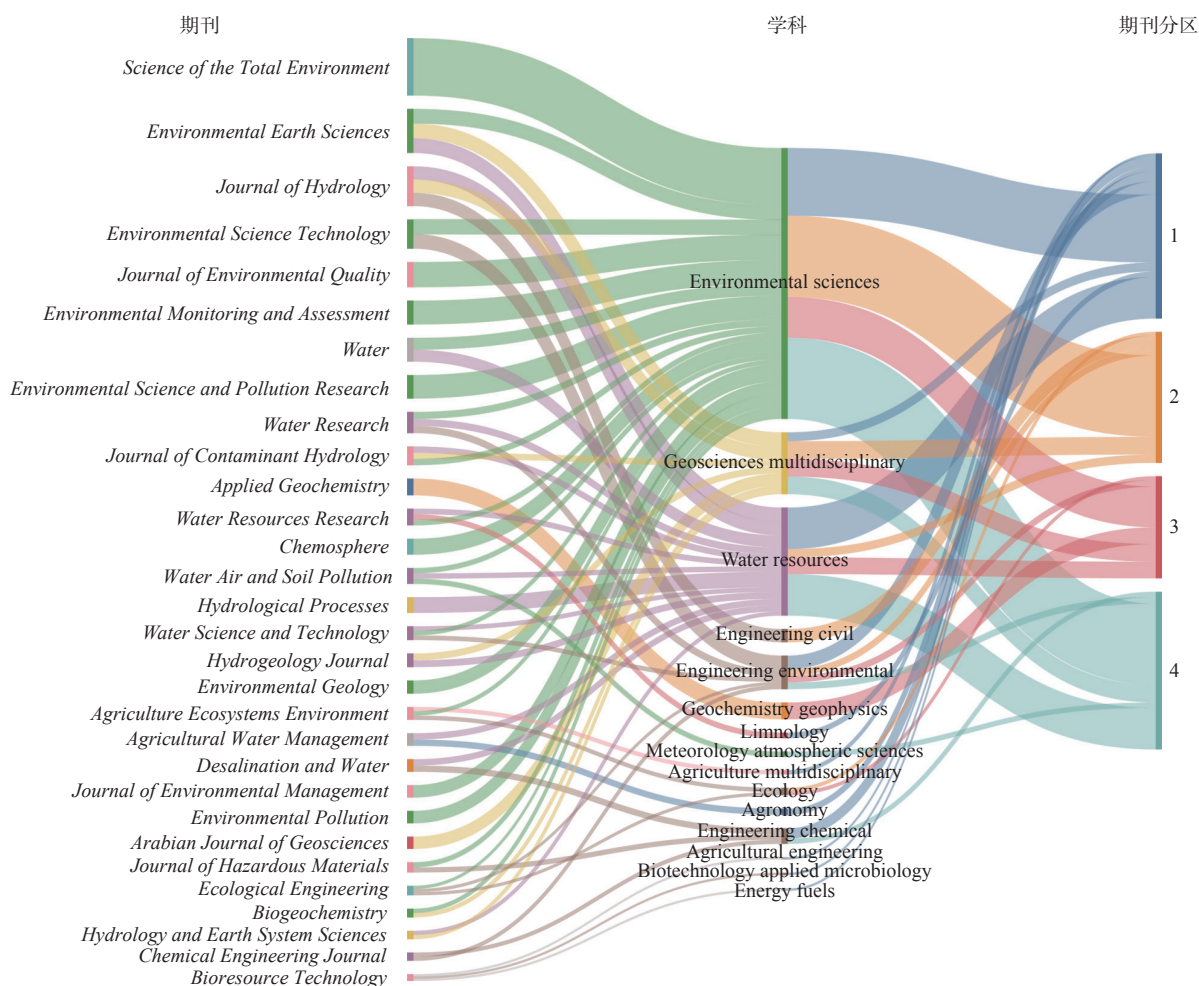


图 3 发文期刊、学科及分区关系图

Fig. 3 Relationship between issuing journals, disciplines and divisions

篇)、美国内政部(United States Department of The Interior, 452 篇)、美国地质调查局(United States Geo-

logical Survey, 447 篇)、美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA, 425)篇和中国地质大学

(China University of Geosciences, 378 篇)。发文量前 10 的机构主要分布在美国和中国,且前 10 位机构中,美国机构占据 60%、中国机构占据 20%、法国和德国机构各占 10%。按基金资助量统计,资助量前 5 位的基金或资助机构为中国国家自然科学基金会(National Natural Science Foundation of China, NSFC, 1 659 篇)、美国国家科学基金会(National Science Foundation, NSF, 391 篇)、欧洲委员会(European Commission, 238 篇)、中央高校基本科研业务费专项资金(Fundamental research funds for the central universities, 226)篇、英国研究创新中心(UK Research Innovation, UKRI, 201 篇),其中中国基金资助量占比最大,美国、欧洲、英国基金资助量并列。上升至前 10 位,中国与美国基金资助量占比相同(30%)、其次是英国(20%)、最后是欧洲和西班牙(10%)。中国作为发文量前 5 的国家中起步最晚的国家,在地下水硝酸盐污染研究领域发展迅速,从机构发文量和基金资助情况中推断,良好的科研环境及资金支持是推动研究发展的重要因素,也显示出中国在这个领域具有良好的发展潜力及前景。

2.4 关键词分析

关键词共现反映了文献所要表达的各个主题之间的相互关系,是文章中心的核心概括,分析关键词有利于研究地下水硝酸盐污染领域的主要研究内容^[22]。通过 VOS viewer 软件的聚类分析得到 339 个关键词,如图 4 所示,将聚类后的关键词图谱归纳为 4 个研究主题,分别为:溯源(绿色)包括关键词 91 个、迁移转化机理(黄色)包括关键词 74 个、污染修复(红色)包括关键词 97 个、风险评估(蓝色)包括关键词 77 个。不同聚类研究的内容有所区别,具体的研究内容将在 3.1 讨论部分展示。

关键词的叠置分析揭示了研究的热点内容,可以表明地下水硝酸盐污染研究的未来趋势和发展方向。由于 1990 年前文献数量较少,热点关键词不明显,因此本文从 1990 年之后开始分析。将 1990—2022 年划分为 4 个时期进行叠置分析,得到每个时期关键词的贡献图。研究选取了各时期贡献度最高的前 20 个关键词进行分析(图 5),图中圆圈的大小代表关键词的贡献度。

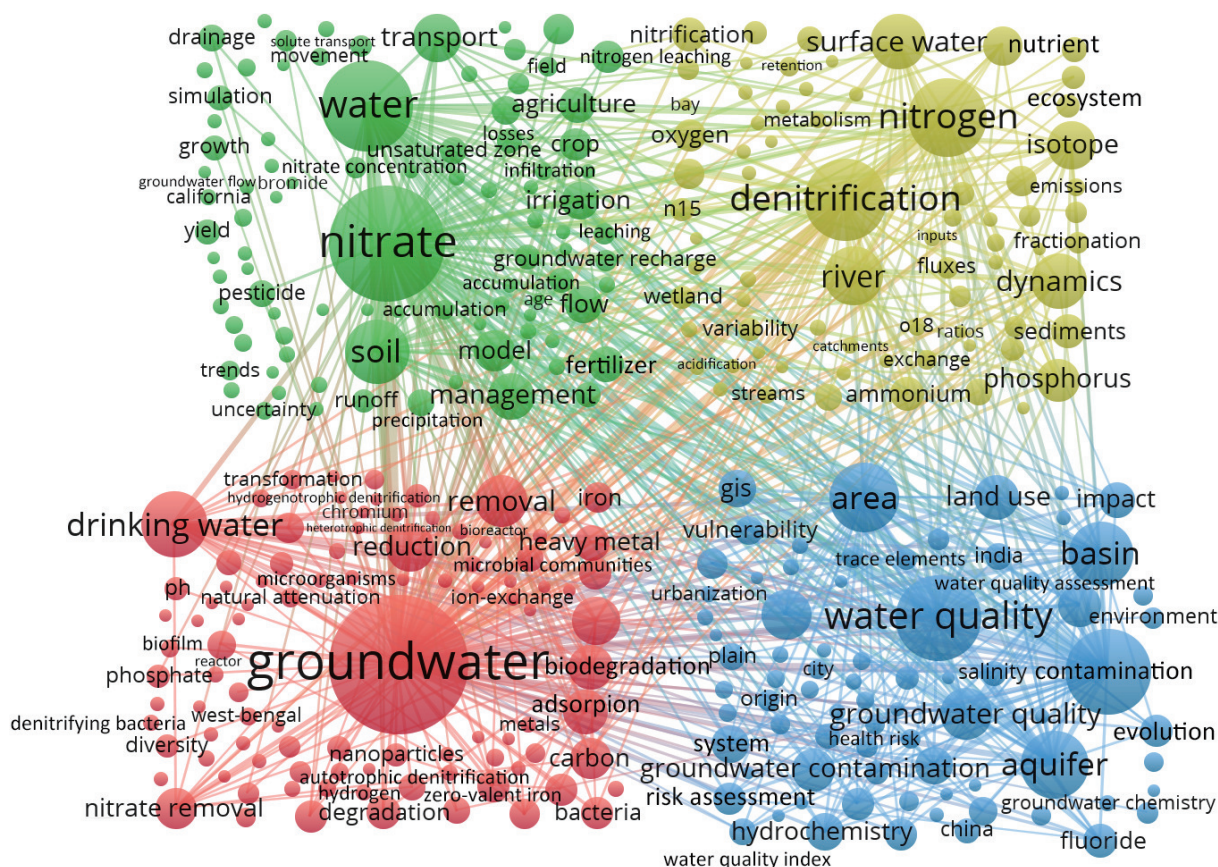


图 4 地下水硝酸盐污染领域关键词共现图(绿色:溯源;黄色:迁移转化机理;红色:污染修复;蓝色:风险评估)

Fig. 4 Co-occurrence map of keywords in the field of groundwater nitrate contamination (green: traceability; yellow: transport and transformation mechanisms; red: pollution remediation; blue: risk assessment)

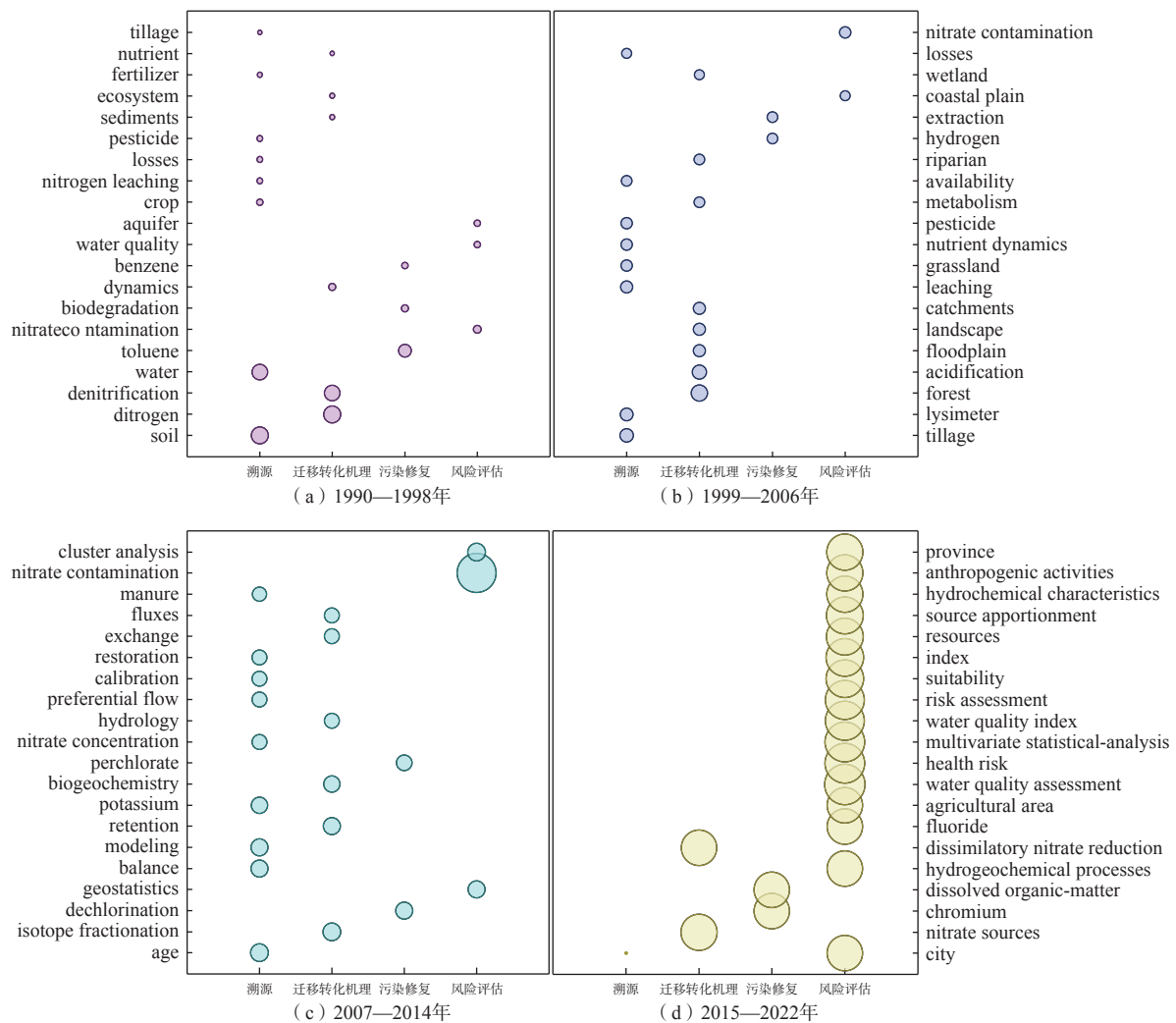


图 5 地下水硝酸盐污染领域关键词贡献图

Fig. 5 Keyword contributions in the field of groundwater nitrates contamination

3 讨论

3.1 研究内容

3.1.1 溯源

根据关键词共现结果(图 4)分析,在绿色聚类主题溯源中,“农业(agriculture)”“土壤(soil)”“硝酸盐浓度(nitrate concentration)”“氮淋失(nitrogen leaching)”“肥料(fertilizer)”“粪肥(manure)”等关键词主要展示了地下水硝酸盐污染的来源。以我国为例,我国地下水硝酸盐污染主要来源与氮肥相关^[23],并且在我国北方大部分地区研究调查发现农用氮肥是引起地下水硝酸盐污染的主要原因^[24-25]。查明地下水中硝酸盐的来源是控制和治理地下水硝酸盐污染的基础。“灌溉(irrigation)”“降雨(precipitation)”“渗透(infiltration)”“地下径流(groundwater flow)”“地下水补给(groundwater recharge)”等关键词主要展示了地下水硝酸盐污染的

迁移路径。地下水流场对地下水硝酸盐污染的影响是该主题下的重要研究内容。

3.1.2 迁移转化机理

黄色主题可以归纳为迁移转化机理。氮的迁移转化主要由微生物驱动,包括固氮作用、硝化作用、反硝化作用、氨化作用和厌氧氨氧化作用^[26]。根据关键词共现分析,这一主题重点突出了“反硝化作用(denitrification)”与“硝化作用(nitrification)”。其中“同位素(isotope)”技术在该聚类下发挥了极其重要的作用^[27]。通过建立硝酸盐氮同位素的关系,结合水化学参数(如 NO_3^- 浓度、pH值、溶解氧等),分析硝酸盐的来源,判断地下水中反硝化作用的发生与否^[28-29],对于深入认识含水层的硝酸盐自净化能力有很好的推动作用。因此“同位素(isotope)”和“反硝化作用(denitrification)”是黄色主题下出现频率最多的 2 个关键词。

3.1.3 污染修复

红色主题归纳为污染修复,这一主题的关键词数量最多,说明相关的研究较为活跃。地下水本身具有一定的自净能力,只是更新速度非常慢。如此长时间的更新周期就意味着,地下水一旦被污染,仅仅依靠其自身完成全部净化修复几乎是不可能的。“地下水整治(groundwater remediation)”“硝酸盐污染(nitrate)”“硝酸盐去除(nitrate removal)”“硝酸盐还原(nitrate reduction)”等相关关键词数量庞大,表明公众、政府、机构对于地下水硝酸盐污染问题的高度重视。近年来,国内外许多研究学者对地下水硝酸盐污染的修复技术进行研究并取得了较好的成果。其中“离子交换(ion-exchange)”“纳米过滤(nanofiltration)”“脱盐(desalination)”等关键词代表了物理化学法处理硝酸盐的相关技术^[30]。“零价铁(zero-valent iron)”“二价铁(ferrous iron)”“氢(hydrogen)”是化学法去除地下水硝酸盐的主要关键词。用零价铁^[31-33]或者二价铁^[34]作为还原剂去除硝酸盐的方法无法控制还原条件,容易产生副产物,因此,近年来的研究主要是以氢为还原剂,金属 Pd-Cu 或 Pd-Sn 等为催化剂,催化还原地下水中的硝酸盐。能将地下水硝酸盐真正去除的技术是生物处理技术,主要包括原位生物脱氮和反应器生物脱氮^[35-37],例如 Sahinkaya 等^[38]研究了一种新型的基于硫的自养反硝化膜生物反应器去除饮用水中硝酸盐的工艺,效果显著。Li 等^[39]和 Zhao 等^[40]的研究结果都表明在混养条件下自养反硝化和异养反硝化的协同作用,处理能力强、反硝化效率高。生物修复硝酸盐污染在污染修复主题中是热点研究内容,目前还存在着一些问题,比如异养反硝化去除硝酸盐的过程中需要投入有机碳源,存在成本偏高、回收利用过量碳源困难等问题。

3.1.4 风险评估

最后一个蓝色主题可以归纳为风险评估。地下水中硝酸盐随着时间的推移浓度增加,可能影响人类健康,不仅需要进行硝酸盐污染分析,还需要进行风险评估^[41]。蓝色聚类风险评估主题中“水质评估(water quality assessment)”“地下水质量(groundwater quality)”“风险评估(risk assessment)”“健康风险(health risk)”等关键词反映了地下水硝酸盐污染风险评估的重要研究内容:一是地下水水质评价,二是健康风险评估。地下水水质评价方向,Hu 等^[42]通过运用普通克里格法和指标克里格法对比分析,对黄河流域曲周县地下水进行水质评价,结果表明地下水硝酸盐污染主要发生在县城地区,是由于废水灌溉和农田化肥过

量淋滤造成的。Capri 等^[43]在意大利 4 个试验点利用整合危害因素和控制因素的 IPNOA 方法,确定了地下水中硝酸盐的分布,结果表明所有试验点都存在地下水硝酸盐污染和水文地球化学特性的变化。健康风险评估方向,Zhang 等^[44]采用人体健康风险评估模型评价中部渭河下游交口灌区地下水硝酸盐的人体健康风险,结果显示,对孕妇和哺乳期妇女的健康风险高于对 10~16 岁年龄组和 16 岁以上儿童的健康风险。Su 等^[45]使用美国环境保护局开发的四步法结合非致癌物健康风险模型进行硝酸盐氮浓度分析,确定了研究区农业污水灌区存在较大的健康风险,而城市污水灌区风险相对较小。开展定量评估地下水水质与人体健康风险是建立地下水污染管理体系不可缺少的手段。

3.2 研究热点

具体来看关键词叠置分析反映的研究热点,由于 1990 年前文献数量较少,热点关键词不明显,因此本文从 1990 年之后开始分析。第一阶段是 1990—1998 年,如图 5(a)所示,关键词贡献度最高的是“土壤(soil)”,其中主要贡献关键词为“土壤(soil)”“水资源(water)”“硝酸盐污染(nitrate contaminate)”“氮淋失(nitrogen leaching)”“农药(pesticide)”“化肥(fertilizer)”“耕种(tillage)”等大多属于溯源主题。在现代农业发展初期,大量使用氮肥,例如美国在 1965—1982 年的 17 年间,谷物地带氮肥施用量从 73.9 kg/hm² 增加到 198.3 kg/hm²^[46],该时期引用最高的文章也证实了氮肥和大气沉降主导了北大西洋温带地区的人为氮输入总量,其中氮肥约占总量的三分之二^[47]。为了控制地下水硝酸盐污染的加剧,学者们同步关注硝酸盐迁移转化机理,因此迁移转化机理聚类的“反硝化(denitrification)”“动力学(dynamic)”关键词贡献度也相对较高。

第二阶段 1999—2006 年和第三阶段 2007—2014 年,如图 5(b)(c)所示,关键词整体贡献度比较均匀,研究的热点主要集中在溯源与迁移转化的机理上,但是相比第一阶段研究内容有了转变,第二阶段在溯源与迁移转化机理中贡献度较高的关键词为“森林(forest)”“冲积平原(floodplain)”“景观(landscape)”“草原(grassland)”“沿海平原(coastal plain)”“湿地(wetland)”等,这说明随着第一阶段农用地硝酸盐污染来源及机理的明确,学者们在第二阶段开始探索不同下垫面类型条件下的硝酸盐污染来源及其迁移转化机理。由第三阶段“同位素分馏(isotope fractionation)”“生物地球化学(biogeochemistry)”“聚类分析(cluster analysis)”“模型(modeling)”等高贡献度关键词可以看出由于硝酸盐来源具有多元性和复杂性,同位素示踪和模型模拟

等技术在此研究阶段被突出强调出来。

第四阶段 2015—2022 年, 如图 5(d) 所示, 贡献度较高的关键词中 80% 属于风险评估主题, 这个数据进一步说明风险评估是地下水管理和保护策略的有效工具, 其中“水质评价(water quality assessment)”关键词贡献度最高, 其次是“健康风险(health risk)”, 与关键词共现分析中风险评估主题的 2 个研究方向一致。例如, Teng 等^[48] 基于地下水对硝酸盐的脆弱性条件, 提出了源-途径-受体-反应模型的地下水硝酸盐风险筛选与评价新框架, 促进了地下水硝酸盐风险评估的系统整合, 但是在该研究中忽略了对脆弱性评价结果的验证, 这也是后续在地下水硝酸盐污染研究领域需重点关注的方向。

4 结论

(1) 自 1968 年以来, 地下水硝酸盐污染研究经历了快速发展阶段, 发文量随时间的发展呈现指数型增长。该领域发文期刊主要集中在环境科学类和水资源类。

(2) 按机构发文量和基金资助情况统计, 前 10 位发文总量中 80% 左右的文章均出自于美国和中国, 说明美国和中国在地下水硝酸盐污染研究领域占有重要地位。

(3) 关键词共现图结果表明, 地下水硝酸盐污染研究领域的主要研究内容涉及到 4 个主题: 溯源、迁移转化机理、污染修复和风险评估。

(4) 关键词的热点分析显示, 1990—2014 年研究的热点主要在溯源与迁移转化机理, 但是具体内容有所区别: 1990—1998 年侧重于硝酸盐污染源的识别, 1999—2014 年侧重于硝酸盐污染源识别方法的研究, 其中同位素和模型模拟方法最为有效。近年来(2015—2022 年)研究的热点在风险评估, 需要着重关注风险评估方法的优化以及地下水脆弱性风险和污染风险的有效结合。

参考文献 (References) :

- [1] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. The united nations world water development report 2022[R/OL]. France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2022[2024-02-26]. <https://www.unesco.org/Open-Access/terms-use-CCB%20ysa-en>.
- [2] BOURGEOIS C, JAYET P A. Regulation of relationships between heterogeneous farmers and an aquifer accounting for lag effects[J]. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 2016, 60(1): 39 – 59.
- [3] WANG Shiqin, WEI Shoucai, LIANG Huiya, et al. Nitrogen stock and leaching rates in a thick vadose zone below areas of long-term nitrogen fertilizer application in the North China Plain: A future groundwater quality threat[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 576: 28 – 40.
- [4] 陈建耀, 王亚, 张洪波, 等. 地下水硝酸盐污染研究综述 [J]. *地理科学进展*, 2006, 25(1): 34 – 44. [CHEN Jianyao, WANG Ya, ZHANG Hongbo, et al. Overview on the studies of nitrate pollution in groundwater[J]. *Progress in Geography*, 2006, 25(1): 34 – 44. (in Chinese with English abstract)]
- [5] United States Environmental Protection Agency. Drinking water standards and health advisories: EPA822-S-12-001[S/OL]. 2012[2024-02-26]. <https://www.doc88.com/p-3117186563311.html>.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地下水质量标准: GB/T 14848—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard for groundwater quality: GB/T 14848—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)]
- [7] 张慧, 丁爱中. 关注地下水氮污染 [J]. 百科知识, 2008 (1): 59 – 61. [ZHANG Hui, DING Aizhong. Concern about groundwater nitrogen pollution[J]. *Encyclopedia of Knowledge*, 2008(1): 59 – 61. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 佚名. 硝酸盐污染地下水 [J]. 能源与节能, 2015(11): 148. [Anonymous. Groundwater pollution by nitrate[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2015(11): 148. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 谭志容, 啜云香, 王新华, 等. 鲁中山丘区地下水硝酸盐污染状况研究 [J]. *地下水*, 2018, 40(5): 59 – 61. [TAN Zhirong, CHUAI Yunxiang, WANG Xinhua, et al. Study on present situation of groundwater nitrate pollution in luzhong mountain area[J]. *Ground Water*, 2018, 40(5): 59 – 61. (in Chinese with English abstract)]
- [10] FENECH C, ROCK L, NOLAN K, et al. The potential for a suite of isotope and chemical markers to differentiate sources of nitrate contamination: A review[J]. *Water Research*, 2012, 46(7): 2023 – 2041.
- [11] 徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 等. 中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展 [J]. *环境科学*, 2014, 35(8): 3230 – 3238. [XU Zhiwei, ZHANG Xinyu, YU Guirui, et al. Review of dual stable isotope technique for nitrate source identification in surface- and groundwater in China[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(8): 3230 – 3238. (in Chinese with English abstract)]

- [12] PICETTI R, DEENEY M, PASTORINO S, et al. Nitrate and nitrite contamination in drinking water and cancer risk: A systematic review with meta-analysis[J]. *Environmental Research*, 2022, 210: 112988.
- [13] ARCHNA, SHARMA S K, SOBTI R C. Nitrate removal from ground water: A review[J]. *E-Journal of Chemistry*, 2012, 9(4): 1667 – 1675.
- [14] WANG Bing, PAN Suyan, KE Ruoyu, et al. An overview of climate change vulnerability: A bibliometric analysis based on Web of Science database[J]. *Natural Hazards*, 2014, 74(3): 1649 – 1666.
- [15] MARTÍNEZ-LÓPEZ F J, MERIGÓ J M, VALENZUELA-FERNÁNDEZ L, et al. Fifty years of the *European Journal of Marketing*: A bibliometric analysis[J]. *European Journal of Marketing*, 2018, 52(1/2): 439 – 468.
- [16] DONTU N, KUMAR S, MUKHERJEE D, et al. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines[J]. *Journal of Business Research*, 2021, 133: 285 – 296.
- [17] 刘雪立. 基于 Web of Science 和 ESI 数据库高被引论文的界定方法 [J]. *中国科技期刊研究*, 2012, 23(6): 975 – 978. [LIU Xueli. Definition method of highly cited papers based on Web of Science and ESI database[J]. *Chinese Journal of Scientific and Technical Periodicals*, 2012, 23(6): 975 – 978. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 金菊良, 陈鹏飞, 陈梦璐, 等. 基于知识图谱的自然灾害风险防控研究进展的文献计量分析 [J]. *灾害学*, 2019, 34(2): 145 – 152. [JIN Juliang, CHEN Pengfei, CHEN Menglu, et al. Bibliometric analysis of research progress in natural disaster risk prevention and control based on knowledge graph[J]. *Journal of Catastrophology*, 2019, 34(2): 145 – 152. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 邱均平. 信息计量学(四) 第四讲 文献信息离散分布规律——布拉德福定律 [J]. *情报理论与实践*, 2000, 23(4): 315 – 320. [QIU Junping, Information metrology (IV) Lecture 4 Discrete distribution law of document information: Bradford's Law [J]. *Information Studies: Theory & Application*, 2000, 23(4): 315 – 320. (in Chinese)]
- [20] 高凯. 文献计量分析软件 VOSviewer 的应用研究 [J]. *科技情报开发与经济*, 2015(12): 95 – 98. [GAO Kai. Research on the application of bibliometric analysis software VOSviewer[J]. *Journal of Library and Information Science*, 2015(12): 95 – 98. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 支传顺, 胡晓农, 陈麟, 等. 微生物对海水入侵响应特征及指示意义的研究进展 [J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(2): 192 – 203. [ZHI Chuanshun, HU Xiaonong, CHEN Lin, et al. Research progress on the response characteristics and indicative significance of microorganisms to seawater intrusion[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(2): 192 – 203. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 王广才, 王焰新, 刘菲, 等. 基于文献计量学分析水文地球化学研究进展及趋势 [J]. *地学前缘*, 2022, 29(3): 25 – 36. [WANG Guangcai, WANG Yanxin, LIU Fei, et al. Advances and trends in hydrogeochemical studies: Insights from bibliometric analysis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(3): 25 – 36. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 朱济成, 田应录. 化学氮肥与地下水污染 [J]. *水文地质工程地质*, 1986(5): 38 – 41. [Zhu Jicheng, Tian Yinglu. Chemical nitrogen fertilizer and groundwater pollution[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1986(5): 38 – 41. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 范祖金, 魏兴, 周育琳, 等. 典型山地农业区浅层地下水硝酸盐来源及转化过程解析 [J]. *环境科学研究*, 2023, 36(10): 1946 – 1956. [FAN Zujin, WEI Xing, ZHOU Yulin, et al. Analysis of nitrate sources and transformation processes in shallow groundwater in typical mountainous agricultural area[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, 36(10): 1946 – 1956. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 张维理, 田哲旭, 张宁, 等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查 [J]. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1(2): 80 – 87. [ZHANG Weili, TIAN Zhexu, ZHANG Ning, et al. Investigation of nitrate pollution in ground water due to nitrogen fertilization in agriculture in North China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 1995, 1(2): 80 – 87. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 郭华明, 高志鹏, 修伟. 地下水氮循环与砷迁移转化耦合的研究现状和趋势 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(3): 153 – 163. [GUO Huaming, GAO Zhipeng, XIU Wei. Research status and trend of coupling between nitrogen cycle and arsenic migration and transformation in groundwater systems[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 153 – 163. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 袁利娟, 庞忠和. 地下水硝酸盐污染的同位素研究进展 [J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(2): 108 – 113. [YUAN Lijuan, PANG Zhonghe. Research on isotopes in groundwater nitrate pollution: A review[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(2): 108 – 113. (in Chinese with English abstract)]
- [28] RIVETT M O, BUSS S R, MORGAN P, et al. Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical

- controlling processes[J]. *Water Research*, 2008, 42(16): 4215 – 4232.
- [29] LI Jie, LIU Yulian, DAI Wei, et al. Nitrate attenuation with rising groundwater levels: An integrated assessment using isotope tracers and microbial signatures[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 624: 129911.
- [30] 毕晶晶, 彭昌盛, 胥慧真. 地下水硝酸盐污染与治理研究进展综述 [J]. *地下水*, 2010, 32(1): 97 – 102. [BI Jingjing, PENG Changsheng, XU Huizhen. Review of research on groundwater nitrate pollution and its removal[J]. *Ground Water*, 2010, 32(1): 97 – 102. (in Chinese with English abstract)]
- [31] CHOE S, CHANG Y Y, HWANG K Y, et al. Kinetics of reductive denitrification by nanoscale zero-valent iron[J]. *Chemosphere*, 2000, 41(8): 1307 – 1311.
- [32] FU Fenglian, DIONYSIOU D D, LIU Hong. The use of zero-valent iron for groundwater remediation and wastewater treatment: A review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 267: 194 – 205.
- [33] GUAN Xiaohong, SUN Yuankui, QIN Hejie, et al. The limitations of applying zero-valent iron technology in contaminants sequestration and the corresponding countermeasures: The development in zero-valent iron technology in the last two decades (1994–2014)[J]. *Water Research*, 2015, 75: 224 – 248.
- [34] FANG Shuaibing, ZHANG Jingxi, NIU Yifan, et al. Removal of nitrate nitrogen from wastewater by green synthetic hydrophilic activated carbon supported sulfide modified nanoscale zerovalent iron: Characterization, performance and mechanism[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 461: 141990.
- [35] ZHENG Peng, CUI Jianyu, HU Lin, et al. Effect of long-term operation of a subsurface wastewater infiltration system (SWIS) based on the limiting value of environmental carrying capacity[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 92: 190 – 198.
- [36] ORTMEYER F, GUERREIRO M A, BEGEROW D, et al. Modified microbiology through enhanced denitrification by addition of various organic substances-temperature effect[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(21): 60282 – 60293.
- [37] CUI Yanxiang, BISWAL B K, GUO Gang, et al. Biological nitrogen removal from wastewater using sulphur-driven autotrophic denitrification[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2019, 103(15): 6023 – 6039.
- [38] SAHINKAYA E, YURTSEVER A, AKTAŞ Ö, et al. Sulfur-based autotrophic denitrification of drinking water using a membrane bioreactor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 268: 180 – 186.
- [39] LI Rui, FENG Chuanping, HU Weiwu, et al. Woodchip-sulfur based heterotrophic and autotrophic denitrification (WSHAD) process for nitrate contaminated water remediation[J]. *Water Research*, 2016, 89: 171 – 179.
- [40] ZHAO Yingxin, ZHANG Baogang, FENG Chuanping, et al. Behavior of autotrophic denitrification and heterotrophic denitrification in an intensified biofilm-electrode reactor for nitrate-contaminated drinking water treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 107: 159 – 165.
- [41] 于勇, 翟远征, 郭永丽, 等. 基于不确定性的地下水污染风险评估研究进展 [J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(1): 115 – 123. [YU Yong, ZHAI Yuanzheng, GUO Yongli, et al. Risk assessment of groundwater pollution based on uncertainty[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(1): 115 – 123. (in Chinese with English abstract)]
- [42] HU Kelin, HUANG Yuangfang, Li Hong, et al, et al. Spatial variability of shallow groundwater level, electrical conductivity and nitrate concentration, and risk assessment of nitrate contamination in North China Plain[J]. *Environment International*, 2005, 31(6): 896 – 903.
- [43] CAPRI E, CIVITA M, CORNIELLO A, et al. Assessment of nitrate contamination risk: The Italian experience[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2009, 102(2): 71 – 86.
- [44] ZHANG Qiying, QIAN Hui, XU Panpan, et al. Effect of hydrogeological conditions on groundwater nitrate pollution and human health risk assessment of nitrate in Jiaokou Irrigation District[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 298: 126783.
- [45] SU Xiaosi, WANG Huang, ZHANG Yuling. Health risk assessment of nitrate contamination in groundwater: A case study of an agricultural area in Northeast China[J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(8): 3025 – 3034.
- [46] 黄贻生. 地下水中的硝酸盐及其发展趋势 [J]. *水土保持科技情报*, 1990(2): 25 – 27. [HUANG Yisheng. Nitrate in groundwater and its development trend[J]. *Scientific and Technological Information of Soil and Water Conservation*, 1990(2): 25 – 27. (in Chinese)]
- [47] HOWARTH R W, BILLEN G, SWANEY D, et al. Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: Natural and human influences[J]. *Biogeochemistry*, 1996, 35(1): 75 – 139.
- [48] TENG Yanguo, ZUO Rui, XIONG, Yanna, et al. Risk assessment framework for nitrate contamination in groundwater for regional management[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 134102.