

微生物对海水入侵响应特征及指示意义的研究进展

支传顺, 胡晓农, 陈 麟, 焦裕飞, 白 晶

Research progress on the response characteristics and indicative significance of microorganisms to seawater intrusion

ZHI Chuanshun, HU Xiaonong, CHEN Lin, JIAO Yufei, and BAI Jing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307014>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海水入侵模拟方法VFT3D及应用

Development and application of sea water intrusion models

王佳琪, 郭芷琳, 田勇, 范林峰, 曾文科, 王晓丽, 苏, Michele Lancia, 郑春苗 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 184–194

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

水力屏障和截渗墙在海水入侵防治中的数值模拟研究

A numerical simulation study for controlling seawater intrusion by using hydraulic and physical barriers

吕盼盼, 宋健, 吴剑锋, 吴吉春 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 32–40

岩溶矿区水文地球化学特征及其水源指示意义

Groundwater source identification in carbonate-hosted deposit using hydrogeochemistry, hydrogen and oxygen isotope method

黄荷, 陈植华, 王涛, 罗朝晖, 张亮, 王剑, 项彩娟, 孙帮涛, 王勇 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 19–19

地下水环境中的硫代砷研究进展

Advances in thioarsenic in groundwater systems

严克涛, 郭清海 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 132–141

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.1000-3665.202307014

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.

微生物对海水入侵响应特征及指示意义的研究进展

支传顺¹, 胡晓农¹, 陈麟², 焦裕飞¹, 白晶¹

(1. 济南大学水利与环境学院, 山东 济南 250022;

2. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034)

摘要: 海水入侵是全球性环境地质问题, 对沿海城市的供水安全及生态环境造成严重威胁。微生物对环境变化具有高度的敏感性, 近年来许多学者开始关注微生物对海水入侵的响应特征, 为海水入侵调查研究提供了新的思路与方法。为了充分认识该领域的研究进展, 基于 Web of Science 核心数据库, 利用文献计量学可视化分析方法对海水入侵微生物响应特征研究现状、热点及趋势进行分析。文献分析结果表明: 该新兴研究领域的成果集中出现在 2011 年以后, 发文量和引文量呈现上升趋势; 中国积极参与海水入侵微生物响应特征研究, 其发文量及高引用指数均位居世界第二位, 研究成果具有较高的学术影响力; 由关键词聚类分析可知, 该领域热门研究方向包括地下水微生物群落对海水入侵的响应研究、土壤微生物群落对海水入侵的响应研究、元素地球化学循环与微生物作用研究。研究结果表明: 咸-淡水交互区微生物群落演替受盐度、溶解氧、温度、有机碳、pH 值等多种因子的共同影响, 其主控因子随水文地质条件的不同而变化; 海水入侵会影响微生物介导的碳、氮、硫、铁等物质循环过程; 在含水层中发现的典型海洋细菌及嗜盐古菌对海水入侵的识别具有重要指示意义, 相关技术是海水入侵传统调查方法的有力补充, 在古海水入侵、现代海水入侵的辨别应用中具有较大优势和潜力。

关键词: 海水入侵; 地下水; 微生物群落; 地球化学; 文献计量学

中图分类号: P641.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)02-0192-12

Research progress on the response characteristics and indicative significance of microorganisms to seawater intrusion

ZHI Chuanshun¹, HU Xiaonong¹, CHEN Lin², JIAO Yufei¹, BAI Jing¹

(1. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China;

2. Shenyang Geological Survey Center, China Geological Survey, Shenyang, Liaoning 110034, China)

Abstract: Seawater intrusion is a global environmental geological issue that poses a serious threat to the water supply security and ecological environment of coastal cities. Microorganisms exhibit a high sensitivity to environmental changes, and in recent years, numerous scholars have turned their attention to the response characteristics of microorganisms to seawater intrusion, offering new perspectives and methodologies for research in this field. To completely understand the research progress in this field, this study, based on the Web of Science core database, employed bibliometric visualization analysis methods to analyze the current status, hotspots, and

收稿日期: 2023-07-11; 修订日期: 2023-09-06

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42202277; 42102294); 山东省自然科学基金项目(ZR2022QD024); 山东省高等学校青创科技支持计划(2023KJ318); 济南市“新高校 20 条”引进创新团队项目(2021GXRC070)

第一作者: 支传顺(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要从事水文地球化学及海水入侵水化学效应方面的研究。E-mail: stu_zhics@ujn.edu.cn

通讯作者: 胡晓农(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事海岸带水文地质及岩溶地质方面的研究。E-mail: stu_huxn@ujn.edu.cn

trends of research on microbial response characteristics to seawater intrusion. The results indicate that significant developments in this emerging research area have mainly occurred after 2011, with a consistent increase in publication volume and citation counts. Chinese scholars actively engage in the research of microbial responses to seawater intrusion, ranking second in terms of both publication output and h-index, with a significant academic impact. Keyword cluster analysis reveals that popular research topics in this field encompass the response of groundwater microbial communities to seawater intrusion, investigations into soil microbial communities' response to seawater intrusion, and the geochemical cycling of elements in conjunction with microbial processes. The study indicates that the succession of microbial communities in brackish-saline water transition zones is jointly influenced by factors such as salinity, dissolved oxygen, temperature, organic carbon, and pH. The primary controlling factors vary with hydrogeological conditions. The intrusion of seawater impacts microbial-mediated processes involved in the cycling of carbon, nitrogen, sulfur, iron, and other substances. The identification of typical marine bacteria and halophilic archaea found in aquifers holds significant indicative value concerning seawater intrusion. This serves as a potent complement to traditional investigative methods for seawater intrusion, offering substantial potential and advantages in distinguishing paleoseawater intrusion and seawater intrusion.

Keywords: seawater intrusion; groundwater; microbial community; geochemistry; bibliometric

我国约 45%(全球约 44%)的人口居住在滨海城市, 国家重要的经济中心, 如环渤海湾、长三角、珠三角均分布在滨海地区。人类活动(地下水超采、河道拦水、河道采砂等)及自然条件变化(海平面上升、连续干旱、海岸地质条件变化等)导致滨海地区地下淡水水头低于海水水头, 海水与淡水之间的水动力平衡被破坏, 造成咸淡水界面向陆地方向移动, 即发生海水入侵^[1]。“十三五”国家重点研发计划“黄渤海沿海地区地下水管理与海水入侵防治研究”最新研究成果表明, 我国辽宁、河北、山东、江苏、浙江、福建、广东、广西、海南等 9 个省份遭受不同程度海水入侵^[2]。海水入侵导致地下水水质恶化、土壤盐渍化、地表生态退化及地下设施腐蚀等一系列问题, 对沿海地区水资源安全、粮食安全及生态安全造成严重危害。

从 1968 年在德国汉诺威召开第一届“海水入侵学术讨论会”以来至今几十年, 全世界的科学家致力于海水入侵的调查与识别、地下水流及溶质运移模拟、海水入侵防治技术等领域的研究。海水入侵调查是判断海水入侵程度、预测海水入侵变化趋势、防治海水入侵的重要前提。常见的海水入侵调查与识别方法有地下水监测^[3-4]、水化学分析^[5-6]、同位素示踪^[7-9]、地球物理探测^[10-11]及数值模拟^[12-13]等(表 1)。微生物作为地下水中最活跃的因子之一, 在含水层中起到催化各种理化反应的作用, 随着高通量测序技术的快速发展, 微生物群落组成及多样性分析已广泛应用于元素地球化学循环、有机污染修复、金属矿产勘探等

方面的研究^[14-15]。近年来, 国内外学者将微生物技术引入到海水入侵的识别研究^[16-18], 胡晓农教授团队系统探究了我国山东、广东沿海地区地下水微生物群落对海水入侵的响应特征^[18-19], 为海水入侵调查研究提供了新的思路及方法。

本文广泛收集海水入侵对微生物影响研究的国内外文献, 利用文献计量学方法对发文量、作者、机构、学科领域、国家等进行分析, 采用 VOSviewer 可视化软件对文章关键词进行聚类, 从而挖掘该研究领域的研究现状、热点及趋势。

1 研究方法

以 Web of Science 核心合集数据库收录的论文为主要研究对象, 运用高级检索, 将搜索主题设置为: TS=(microb* AND seawater intrusion) OR TS=(microb* AND saltwater intrusion), 时间范围是 1985 年 1 月至 2023 年 6 月, 文献类型选择“article”及“review”。按照上述条件检索出文献共 204 篇, 时间跨度为 2011—2023 年。

本文应用文献计量法对相关研究发文量、文献被引频次、学科领域、作者、机构和关键词等进行分析。VOSviewer 是由荷兰莱顿大学科技研究中心(CWTS)于 2009 年开发的一款用于文献计量网络构建和可视化的软件。文献网络包括期刊、研究人员或个人出版物等, 可通过引文分析、耦合网络、共引分析或合著关系来构建网络。与 CiteSpace、HistCite、

表 1 传统海水入侵调查方法
Table 1 Traditional investigation methods of seawater intrusion

方法	地下水监测	地球化学示踪		地球物理探测	数值模拟
		水化学示踪	同位素示踪		
分类	水位、电导率、水温等	溶解性总固体、Cl ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 、Cl/Br、Na/Cl、Ca/Mg等	² H、 ¹⁸ O、 ³ H、 ¹⁴ C、 ³⁴ S、 ³⁷ Cl、 ⁸¹ Br、 ⁸⁷ Sr、 ¹¹ B、 ⁷ Li等	电阻率法(ERI、VES)、电磁法(TDEM、FDEM、AEM)、激发极化法(IP)等	突变界面模型、单一组分过渡带模型、多组分过渡带模型等
优点	结果直观,可初步限定咸-淡水界面位置	结果直观,可反映海水入侵程度	可识别地下水咸化的不同来源	可快速识别咸水界面的空间分布	可模拟、预测海水入侵发生及发展过程
缺点	建设成本高;无法识别地下水盐分来源	数据代表性取决于取样密度;结果的解释相对复杂,需要多种同位素难以准确识别地下水盐分来源	进行追踪;示踪时间有限;成本高昂	地层岩性、含水层特征等会干扰海水入侵物探结果解译	需要掌握详细的地质资料及水文地质参数
文献	[4, 20-21]	[22-23]	[9, 24-25]	[26-27]	[12, 28-29]

BibExcel 等科学知识图谱绘制工具相比, VOSviewer 在主题聚类方面更加清晰详细, 广泛应用于地质、水文地质、环境等研究领域^[30-31]。本文利用 VOSviewer 对海量关键词进行聚类, 从而挖掘该领域的研究热点。

2 结果

2.1 发文量与引文量

基于上述条件在 Web of Science 检索得到 204 篇文献, 施引文献 3 434 篇(去除自引后 3 324 篇); 总被引次数 4 376 次(去除自引后 3 926 次), 篇均被引频次 21.45, 高引用指数(h 指数)为 34。通过对逐年发文量的统计可知(图 1), 2011—2023 年期间全球发文量与被引量呈现整体上升趋势, 可细分为 3 个阶段: 发文量及被引量较少(2011—2013 年)、缓慢增长(2014—2017 年)、快速增长(2018—2022 年); 2023 年统计数据截至 2023 年 6 月, 发文量较少, 根据历年发文量趋势分析, 预测 2023 年发文量将达到 34 篇。由检索结果可知, 微生物对海水入侵的响应研究成果主要发表于 2011 年以来, 为新兴研究方向。一方面, 地球化学示踪、地球物理探测、数值模拟等传统海水入侵调查识

别方法趋于成熟, 且具有一定的局限性(表 1); 另一方面, 现代海水入侵及古咸水入侵难以区分, 亟待新证据的支撑; 此外, 近些年来高通量测序技术的发展使得微生物分析技术广泛应用于地质及水文地质研究领域。

2.2 国家

根据 Web of Science 数据库收录情况来看, 2011—2023 年, 从事海水入侵对微生物群落影响研究的科研人员主要分布在全球 50 多个国家, 发文量排在前 10 的国家详见表 2。发文量最多的是美国, 共计 83 篇, 占发文量总数的 40.69%; 排在第 2 位的是中国, 共计 53 篇, 占 25.98%; 第 3 位是德国, 共计 20 篇, 占 9.80%, 之后依次是意大利、西班牙、澳大利亚、法国、韩国、加拿大、印度。这些国家拥有较长的海岸线, 如美国海岸线长 2.3×10⁴ km, 中国大陆海岸线长 1.8×10⁴ km。沿海城市经济发达、人口密集, 海水入侵对当地用水安全及生态环境造成了严重威胁, 制约经济发展。按照海岸带地质条件及物质组成, 可分为基岩海岸、砂质海岸、淤泥质海岸等^[32]。与基岩海岸相比, 砂质海岸及淤泥质海岸更易发生海水入侵, 砂质海岸及淤泥质海岸占中国总海岸线长度的 60% 左右^[33]。自然地理背景、面临的地下水环境问题、综合科研实力是促进各国开展海水入侵相关研究的主要因素。从每篇论文平均被引次数来看, 中国属于中等水平, 但是 h 指数排在第 2 位, 即高被引论文数量位居前列, 表明中国学者在该研究领域具有较高的影响力。

全球发文量排名前列的研究机构主要有佛罗里达州立大学(State University System of Florida)、佛罗里达国际大学(Florida International University)、弗吉尼亚联邦大学(Virginia Commonwealth University)、中国科学院(Chinese Academy of Sciences)、中国地质大学(China University of Geosciences)等。发文量排名前列

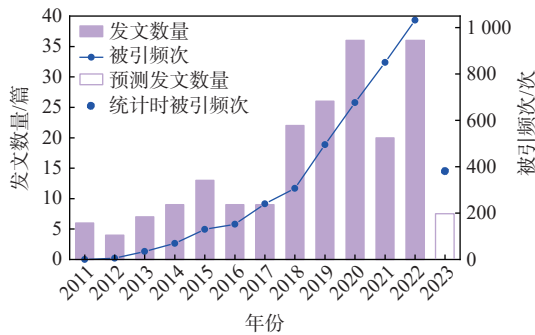


图 1 2011—2023 年微生物对海(咸)水入侵响应研究
发文数量与被引频次

Fig. 1 The number of cited and published papers on microbial response to seawater (or saltwater) intrusion from 2011 to 2023

表 2 2011—2023 年发文量前 10 的国家

Table 2 Top 10 countries in terms of the number of published papers from 2011 to 2023

排序	国家	收录/篇	发文量占比/%	h指数	被引次数总计	每篇平均被引次数
1	美国	83	40.69	24	2 273	27.39
2	中国	53	25.98	18	1 143	21.57
3	德国	20	9.80	11	433	21.65
4	意大利	12	5.88	9	382	31.83
5	西班牙	10	4.90	5	280	28.00
6	澳大利亚	9	4.41	7	88	9.78
7	法国	9	4.41	6	293	32.56
8	韩国	8	3.92	6	110	13.75
9	加拿大	7	3.43	4	70	10.00
10	印度	7	3.43	4	90	12.86

的资助机构主要有中国国家自然科学基金委员会(National Natural Science Foundation of China)、美国国家自然科学基金委员会(National Science Foundation)、美国能源部(United States Department of Energy)、欧盟委员会(European Commission)等。发文机构和资助机构统计结果表明,中国在海水入侵对微生物群落影响研究领域投入经费较多,该研究领域较快的发展速度离不开中国国家自然科学基金委员会的支持。

2.3 学科分类

微生物对海(咸)水入侵的响应研究呈现出多元化交叉学科发展趋势。对发文量排名前 10 的学科进行统计(图 2),发文量第一的学科是环境科学(environmental sciences),发文量 86 篇,学科占比 31.9%;其次是水资源(water resources),发文量 33 篇,学科占比 12.2%;排名第三的是地球科学(geosciences),发文量 32 篇,学科占比 11.9%,与水资源学科发文量相当;排在后面的是生态学(ecology)、土壤学(soil science)、微生物学(microbiology)、海洋与淡水生物学(marine freshwater biology)、海洋学(oceanography)、地球化学与地球物理学地质学(geochemistry geophysics)、湖沼学(limnology)。海水入侵往往会造成土壤盐渍化、地下水咸化、地表生态环境恶化等问题,然而环境要素的变化必然影响微生物的生长繁殖或引入新的微生物物种。从研究对象来看,探究微生物对海(咸)水入侵的响应特征,可以从土壤、地表水、地下水、地表生态等不同研究对象入手。因此,该领域的研究主要涉及环境科学、地球科学、水资源等学科。另外,从技术手段角度考虑,微生物对海(咸)水入侵的响应研究需要环境科学、微生物学、地球化学与地球物理学、海洋学等领域不同技术手段的协调和应用^[34-35]。

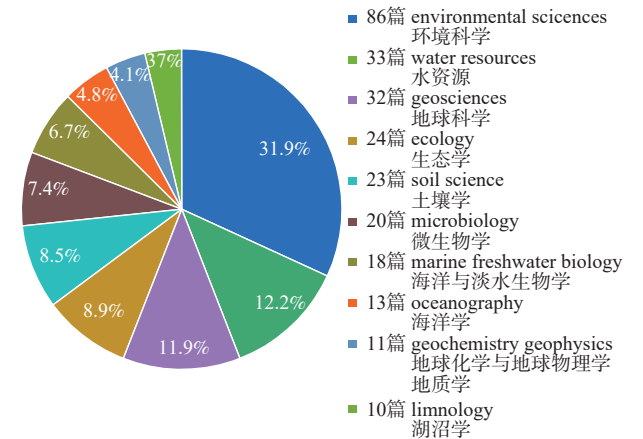


图 2 微生物对海(咸)水入侵的响应研究发文量前 10 学科

Fig. 2 Top 10 discipline on the response of microorganisms to seawater (or saltwater) intrusion

2.4 关键词聚类

关键词是对一篇论文核心论点及主题的高度概括,对某一领域关键词的分析有助于挖掘该领域的研究热点。基于上述检索获取的 204 篇文献,使用 VOS-viewer 对众多关键词进行提取,将阈值设置为 10 (即关键词出现次数不少于 10 次),筛选出符合条件的关键词 35 个,关键词之间联系紧密,共形成 411 条链接(图 3)。图谱中节点颜色反映出 3 个主题集群,绿色集群关键词包括:海水入侵(seawater intrusion)、海岸带含水层(coastal aquifer)、地下水(groundwater)、微生物群落(bacterial community)、多样性(diversity)、盐度梯度(salinity gradient)、动力学(dynamics)等;蓝色集群关键词包括:土壤(soil)、滨海湿地(coastal wetlands)、盐沼(salt-marsh)、盐化作用(salinization)、微生物量(microbial biomass)、有机碳(organic-carbon)、矿化作用(mineralization)等;红色集群关键词包括:咸水入侵(saltwater intrusion)、沉积物(sediment)、群落结构(community structure)、碳(carbon)、硫酸盐还原(sulfate reduction)、甲烷(methane)、氮(nitrogen)、盐度(salinity)等。不同主题的研究对象、研究内容差异明显,但由链接情况可知各研究主题之间的联系较为密切。

3 讨论

3.1 研究热点

以往关于盐度梯度或高盐环境下微生物群落多样性及结构的研究大多集中在盐湖、湿地和海洋环境^[36-39]。近些年,受海水入侵影响发生的地下水、土壤、沉积物中微生物群落演替及元素生物地球化学循环逐渐受到学者们的关注。根据关键词聚类(图 3)

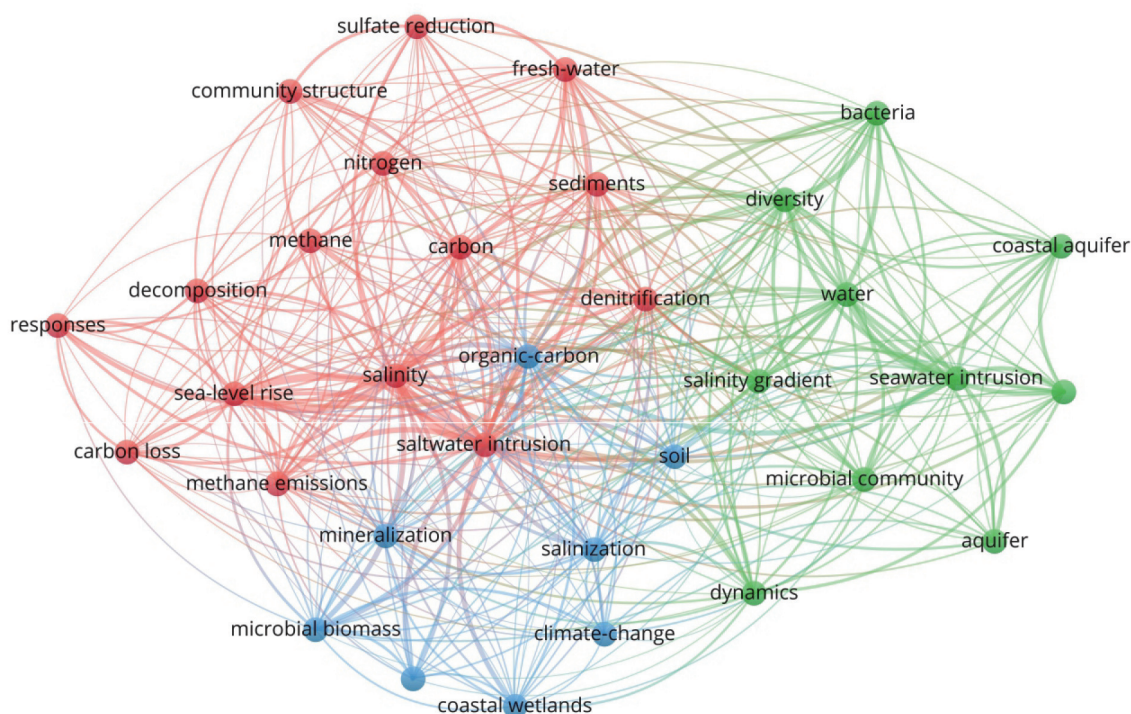


图3 关键词聚类图

Fig. 3 Cluster diagram of keywords in 204 publications

结果,可以总结得到3个热点研究主题:绿色集群代表了地下水微生物群落对海水入侵的响应研究、蓝色集群代表了土壤微生物群落对海水入侵的响应研究、红色集群代表了元素地球化学循环与微生物作用研究。

3.1.1 地下水微生物群落对海水入侵的响应研究

本次研究检索得到的204篇文献中,有67篇论文的研究内容与地下水有关。微生物在地下水中的分布特征与地下水的物理化学特性密切相关^[40]。在海水入侵形成的咸-淡水交互区尤其如此,海水混合作用改变了地下水的物理化学性质,进而影响微生物群落多样性及结构^[41]。Lee等^[16]在韩国济州岛研究发现,地下水微生物群落组成与地下水温度呈显著正相关关系。Adyasari等^[42]在印度尼西亚爪哇岛北部海水入侵区,通过冗余分析发现地下水盐度及温度是影响微生物群落组成的主控变量。在西班牙滨海碳酸盐岩含水层中,脱硫杆菌目(*Desulfobacterales*)、脱硫弧菌目(*Desulfovibrionales*)、弯曲菌目(*Campylobacterales*)和交替单胞菌目(*Alteromonadales*)则与二氧化碳分压呈负相关^[43]。溶解氧在调节微生物分布和功能方面起着至关重要的作用,研究发现溶解氧对咸-淡水交互区中碳、氮、硫、甲烷等微生物代谢过程具有显著影响^[44-45]。

相比于其他因素,盐度是决定咸-淡水交互区微生物群落结构分布最为重要的环境因子之一^[42, 46-48]。盐

度往往对微生物的活性有抑制作用,并且抑制作用随盐度的升高而增强^[49-52],然而,近期在山东龙口、山东东营、广东珠三角、西班牙马略卡岛等多个地区调查发现,咸-淡水交互区地下水微生物多样性并未按照盐度的升高而持续降低^[18, 43, 47, 53-54]。在这种情况下,盐度可能与其他环境参数密切相关,如有机物浓度、温度和pH值。Jiang等^[54]研究发现,地下水盐度增加会促使有机碳从沉积物表面发生解吸附,地下水有机碳浓度增加进而促进异养微生物群落的繁衍。与细菌多样性相比,古菌群落组成及分布受地下水盐度影响可能较小^[55]。因此,咸-淡水交互区微生物群落演替受盐度(或Cl⁻浓度)、溶解氧、温度、有机碳、氧化还原电位、二氧化碳分压、pH值等多种环境因子的共同影响,其主控因子随水文地质条件的不同而变化。

3.1.2 土壤微生物群落对海水入侵的响应研究

土壤(包括湿地土壤、沼泽地等)微生物作为生态系统中重要的分解者,其与环境的相互作用受到了广泛关注。在上述检索得到的204篇文献中,有95篇论文的研究内容与土壤有关。全球气候变暖背景下,海平面上升引起的海水入侵对全球沿海农业土壤环境和湿地生态系统造成严重威胁^[56]。海水入侵使得地下水溶解性总固体质量分数升高,在毛细作用下水分及盐分运移至土壤表层,蒸发浓缩作用造成土壤盐分积

累,造成盐碱化。土壤微生物参与有机质分解、碳氮养分循环、土传病害防治、污染物降解等重要过程,微生物群落受土壤 pH 值、有机碳、总氮、盐度、土壤深度等环境因子的影响^[56-59]。

高盐对土壤微生物的影响主要有 2 种方式:渗透胁迫和特定离子毒性^[60]。黄河三角洲湿地微生物丰度及 α -多样性随盐度增大呈现下降趋势,变形菌门(*Proteobacteria*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)、酸杆菌门(*Acidobacteria*)和浮霉菌门(*Planctomycetes*)占湿地细菌群落的 70% 以上,具有较强的耐盐能力^[52]。Shao 等^[61]探究了不同盐度条件下微生物残留物对土壤有机碳的积累,结果表明土壤盐度升高,真菌残留物对土壤有机碳的贡献降低,而细菌残留物的贡献基本不变。Jackson 等^[59]研究表明海水入侵降低了土壤养分的循环速率,原因是土壤盐分的增加降低了微生物酶活性。海水入侵携带的高浓度 SO_4^{2-} 及 Cl^- 能够影响土壤产甲烷、硫酸盐还原、硝化、反硝化等微生物介导过程,进而影响二氧化碳、甲烷、一氧化二氮等温室气体的排放。

也有学者认为:相较于海水入侵作用,不同深度土壤物理化学性质的变化对微生物群落演替产生的影响可能更大^[44, 62]。Hong 等^[44]将土壤由上至下划分为好氧、好氧-厌氧过渡带、厌氧层位,不同层位土壤微生物群落组成差异显著,且好氧-厌氧过渡带微生物多样性指数明显高于浅层及深层土壤。

3.1.3 元素地球化学循环与微生物作用研究

海水入侵改变了土壤、地下水中微生物群落组成,进而影响着碳、氮、磷、硫等物质循环过程。开展海水入侵影响下生物地球化学循环过程研究,对生态系统管理、环境保护、资源管理和应对气候变化具有重要理论意义和现实意义^[63-65]。在海水入侵区已广泛发现与碳、氮、硫循环相关的菌属,如珠江入海口、黄河入海口地下水中存在产甲烷球菌(*Methanococcus*),氨氧化古菌(*Candidatus_Nitrosoarchaeum*)、脱硫弧菌(*Desulfovibrio*)、硫酸还原菌(*Sulfobacterales*)及铁还原菌(*Geopsychrobacter sp.*)等^[53]。西班牙碳酸盐岩地下水中硫氧化细菌(*Sulfuriflexus mobilis*)及杆状脱硫微菌(*Desulfomicrobium baculatum*)介导的酸化作用对碳酸盐岩的溶解起着重要作用,有利于海水入侵向内陆推进^[66]。在美国弗吉尼亚州地下河口,通过 PICRUST 软件对沉积物中氮、甲烷、硫代谢功能基因进行预测,丰度较高的为氮代谢功能基因(Denitrification-*nirK*、Denitrification-*nosZ*、DNRA-*nrfA*、Nitrogen Fixation-

nifH)、甲烷代谢功能基因、(Methane oxidation-*mmoA*)硫代谢功能基因(Sulfite reduction-*dsrA*)^[54]。

海水入侵对碳生物地球化学循环的影响主要表现为:海水入侵导致 SO_4^{2-} 浓度的升高,会增强沉积物中硫酸盐还原菌的活性,硫酸盐还原菌与产甲烷菌争夺电子供体,从而抑制甲烷气体的产生^[67-68]。此外,微生物硫酸盐还原过程会将甲烷作为电子供体,使甲烷氧化,微生物硫酸盐还原作用耦合甲烷厌氧氧化过程是滨海湿地、泥炭及海底中甲烷的重要消耗方式^[69-70]。以上碳硫循环过程对温室气体的排放具有重要影响。

盐度梯度的变化亦会对硝化及反硝化过程产生影响,且这 2 个过程与一氧化二氮的排放与消耗有关。早先研究表明盐度增加会降低硝化反应速率,而对反硝化作用的影响较为复杂^[71]。由于好氧反硝化细菌群落具有较高的脱氮效率和耐盐能力,未来可作为生物修复菌株添加到沿海湿地环境中,提高天然湿地的脱氮活性,缓解沿海地区严重的氮污染。

此外,由生物氧化还原反应驱动的硫循环过程与铁循环密切相关。盐渍化一般有利于湿地土壤中硫化铁矿物的形成,如马基诺矿和黄铁矿^[72]。硫与铁的相关作用间接影响磷循环过程,三价铁通常被还原为易溶的二价铁形式,并在溶液中与硫化物发生反应,导致磷酸铁矿物的溶解,从而释放磷酸盐离子^[73]。

综上所述,海水入侵不仅改变了地下水及土壤微生物群落组成,并且影响着微生物介导的碳、氮、硫、铁等元素的循环过程(图 4)。

3.2 海水入侵指示微生物

海水入侵对地下水、土壤及沉积物环境中的微生物群落组成可产生重要影响,并进一步改变元素地球化学循环过程。从另一角度来看,不同分类水平的微生物群落特征亦可以指示海水入侵的发生。由于具体的微生物种群名称通常不会出现在关键词及题目之中,单纯用知识图谱可视化工具难以识别海水入侵背景下的特征微生物。因此,本文单独对海水入侵的指示微生物进行了总结(表 3)。

在咸-淡水交互区地下水中,变形菌门(*Proteobacteria*)是最丰富的细菌门类,占比往往超过 50%,其次为拟杆菌门(*Bacteroidetes*)、厚壁菌门(*Firmicutes*)、放线菌门(*Actinobacteria*)、绿弯菌门(*Chloroflex*)等^[17, 47, 53]。在滨海陆地地下水中发现许多典型的海洋微生物,如在山东龙口地下水中发现海洋螺菌目(*Oceanospirillales*)和交替单胞菌科(*Alteromonadaceae*)^[47];在广东珠

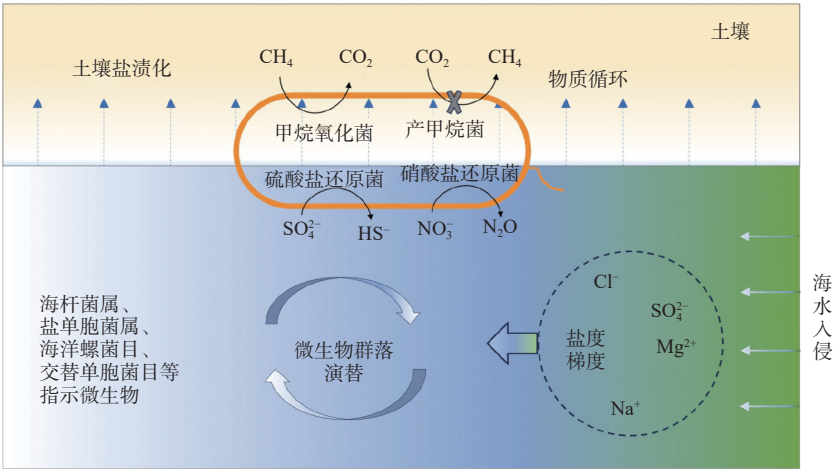


图 4 海水入侵微生物响应概念图

Fig. 4 Conceptual diagram of microbial response to seawater intrusion

表 3 典型研究区海水入侵指示微生物

Table 3 Signature microorganism of seawater intrusion in the typical study areas

研究区	赋存环境	Cl ⁻ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	微生物分类	分类水平(目/科/属)	所属门类	主要影响因子	参考文献
中国山东省龙口市	孔隙水	126 ~ 796	细菌	海洋螺菌目(<i>Oceanospirillales</i>)、交替单胞菌科(<i>Alteromonadaceae</i>)	变形菌门(<i>Proteobacteria</i>)	溶解氧、氧化还原电位、Cl ⁻ 浓度	[47]
中国广东省珠江三角洲	孔隙水	93 ~ 13 442	细菌	海杆菌属(<i>Marinobacter</i>)、交替单胞菌目(<i>Alteromonadales</i>)	变形菌门(<i>Proteobacteria</i>)	盐度、温度、pH	[18, 74]
			古菌	海洋古菌MG I (<i>Marine group I</i>)	奇古菌门(<i>Thaumarchaeota</i>)		
中国广西省北海市	孔隙水	379 ~ 1 396	细菌	甲基单胞菌科(<i>Methylomonadaceae</i>)、帕斯氏细菌科(<i>Paceibacteraceae</i>)	变形菌门(<i>Proteobacteria</i>)	Cl ⁻ 浓度, 水产养殖及地表水体富营养化程度	[55]
			古菌	乌斯古菌目(<i>Woesearchaeales</i>)、硝化古菌科(<i>Nitrosotaleaceae</i>)、球形硝化古菌科(<i>Nitrososphaeraceae</i>)	纳古菌门(<i>Nanoarchaeota</i>) 泉古菌门(<i>Crenarchaeota</i>)		
韩国济州岛	孔隙水	350 ~ 15 427	细菌	红杆菌科(<i>Rhodobacteraceae</i>)、黄杆菌科(<i>Flavobacteriaceae</i>)	变形菌门(<i>Proteobacteria</i>)	Cl ⁻ 浓度	[16, 46]
西班牙	岩溶水	472 ~ 20 028	细菌	硫氧化细菌(<i>Sulfuriflexus mobilis</i>)、杆状脱硫微菌(<i>Desulfomicrobium baculatum</i>)	变形菌门(<i>Proteobacteria</i>)	盐度、有机碳、pH、二氧化碳分压	[43, 66]
印度尼西亚爪哇岛	孔隙水	4 169 ~ 10 249	蓝藻细菌	聚球藻(<i>Synechococcus sp. CC9902</i>)	蓝藻门(<i>Cyanobacteria</i>)	盐度、温度	[42]
			细菌	海杆菌属(<i>Marinobacter</i>)、盐单胞菌属(<i>Halomonas</i>)	变形菌门(<i>Proteobacteria</i>)		
美国东部特拉华州	孔隙水	2 700 ~ 18 900	细菌	脱硫菌属(<i>Desulfovibrio</i>)、 <i>Desulfopila</i> 、 <i>Desulfurispora</i>	变形菌门(<i>Proteobacteria</i>)	二价铁浓度、总铁浓度、盐度、溶解氧	[17]

江三角洲及印度尼西亚爪哇岛地下水中发现海杆菌属(*Marinobacter*)、盐单胞菌属(*Halomonas*)、交替单胞菌目(*Alteromonadales*)^[18, 42](图 4);在韩国济州岛地下水中发现红杆菌科(*Rhodobacteraceae*)及黄杆菌科(*Flavobacteriaceae*)^[16, 46]。以上通常生活在海洋环境中的微生物出现在滨海含水层中,反映了海水入侵可能会将海洋物种携带进入滨海含水层,也说明了滨海含水层咸-淡水交互区是海洋与内陆微生物物种交换的重要场所,对微生物的地理分布起到非常重要的作用。

古菌通常生存于极端水生和陆生生境中,如广古菌门(*Euryarchaeota*)及纳盐古菌门(*Nanohaloarchaeota*)可在极端高盐环境中生活,盐度可高达 300‰^[75]。因此除了细菌群落组成之外,许多学者还对咸-淡水交互区古菌群落组成进行了探究^[53, 55, 66]。Hong 等^[44]发现地下河口沉积物中存在泉古菌门(*Crenarchaeota*)及广古菌门(*Euryarchaeota*),分别占古菌门类的 60%及 30%,小古菌门(*Parvarchaeota*)数量最少。在西班牙碳酸盐岩海岸带含水层中,由浅至深(0 ~ 120 m),

地下水中广古菌门(*Euryarchaeota*)的丰度随海水入侵程度的增强而逐渐增大^[66]。奇古菌门(*Thaumarchaeota*)是全球海洋中的重要微生物类群,在海洋原核浮游生物中的比例可达 20%~40%。Jiang 等^[54]在黄河入海口沉积物中发现,奇古菌门(*Thaumarchaeota*)丰度具有明显的季节波动性,在碳、氮等元素的地球化学循环中起关键作用^[76]。Ma 等^[55]在中国南海北部湾沿岸地下水中发现乌斯古菌(*Woeseearchaeales*),是典型的非自养原核微生物,喜欢在高盐度的环境中生存和繁衍^[77]。此外,桑石磊^[62]在珠江口海水入侵区地下水中发现海洋古菌 MG I (*Marine group I*),其通常分布于海洋水体环境中。以上典型海洋微生物及嗜盐古菌对海水入侵具有重要的指示意义。

4 总结与展望

(1)近年来,微生物在海水入侵调查研究中的应用逐渐受到关注,2011—2023 年该领域发文量及引文量呈逐渐上升趋势。中国积极参与该领域的研究,发文量及 h 指数在各个国家中排名第二。根据 Web of Science 学科分类,该领域研究涉及环境科学(environmental science)、水资源(water resources)、地球科学(geosciences)、生态学(ecology)、土壤学(soil science)、微生物学(microbiology)等多个学科的交叉融合。

(2)通过 VOSviewer 关键词聚类发现,海水入侵导致的地下水、土壤、沉积物中微生物群落演替及元素生物地球化学循环是该领域研究热点。咸-淡水交互区微生物群落演替受盐度、溶解氧、温度、有机碳、pH 值等多种因子的影响,其主控因子随水文地质条件的不同而变化。海水入侵会影响微生物介导的碳、氮、硫、铁等元素的迁移转化,改变物质循环过程。

(3)海杆菌属(*Marinobacter*)、盐单胞菌属(*Halomonas*)、红杆菌科(*Rhodobacteraceae*)、黄杆菌科(*Flavobacteriaceae*)、海洋螺菌目(*Oceanospirillales*)、交替单胞菌目(*Alteromonadales*)等可作为海水入侵识别的指示微生物,这类细菌通常存在于海洋环境中;广古菌门(*Euryarchaeota*)、纳盐古菌门(*Nanohaloarchaeota*)、奇古菌门(*Thaumarchaeota*)等嗜盐古菌亦对海水入侵具有重要指示意义。

以往重点关注地下水中微生物群落对海水入侵的响应,应加强沉积物(深度达几十米至上百米)微生物群落响应研究,有助于区分天然条件及人类活动对微生物群落演替的影响;现代海水及古咸水生境具有显著差异,应发挥微生物技术在区分海水入侵及古咸

水入侵方面的优势,建立海(咸)水入侵识别微生物指标体系;微生物技术是传统海水入侵调查方法的重要补充,多种方法的有机结合是提高海水入侵识别准确性的关键;未来可借助宏基因组技术,探究海水入侵背景下碳、氮、硫循环功能基因变化特征,从根本上揭示海水入侵对物质循环的影响。

参考文献 (References) :

- [1] 薛禹群,谢春红,吴吉春.海水入侵研究[J].水文地质工程地质,1992,19(6):29-33. [XUE Yuqun, XIE Chunhong, WU Jichun. Seawater intrusion[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1992, 19(6): 29-33. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 孙金华,吴永祥,林锦,等.黄渤海沿海地区海水入侵防治与地下水管理研究[J].中国水利,2021(7):20-23. [SUN Jinhua, WU Yongxiang, LIN Jin, et al. Seawater intrusion prevention and groundwater management and study in the coastal area of the Yellow Sea and the Bohai Sea[J]. China Water Resources, 2021(7): 20-23. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李雪,叶思源.海水入侵调查方法研究进展[J].海洋地质与第四纪地质,2016,36(6):211-217. [LI Xue, YE Siyuan. Progress in seawater intrusion[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(6): 211-217. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张康,韩冬梅,曹天正,等.基岩海岛地下水与海水相互作用研究[J].水文地质工程地质,2023,50(1):3-12. [ZHANG Kang, HAN Dongmei, CAO Tianzheng, et al. Interaction between groundwater and seawater in bedrock islands[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 3-12. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 侯国华,高茂生,党显璋.唐山曹妃甸浅层地下水水化学特征及咸化成因[J].地质前缘,2019,26(6):49-57. [HOU Guohua, GAO Maosheng, DANG Xianzhang. Hydrochemical characteristics and salinization causes of shallow groundwater in Caofeidian, Tangshan City[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(6): 49-57. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 郭明华,王敬,戴长国,等.文登区浅层地下水化学演化与海水入侵研究[J].海洋科学,2021,45(7):57-65. [GUO Minghua, WANG Jing, DAI Changguo, et al. Study on the hydrochemical evolution of groundwater and seawater intrusion in the shallow layer of Wendeng District[J]. Marine Sciences, 2021, 45(7): 57-65. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 熊贵耀,付腾飞,韩江波,等.大沽河流域地下水水

- 化学及同位素特征[J]. 海洋科学进展, 2019, 37(4): 626 – 637. [XIONG Guiyao, FU Tengfei, HAN Jiangbo, et al. Hydrogeochemical and isotopic characteristics of groundwater in Dagu River Basin[J]. *Advances in Marine Science*, 2019, 37(4): 626 – 637. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 侯国华, 高茂生, 党显璋, 等. 江苏盐城滨海地区浅层地下咸水的水盐来源及咸化成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(4): 48 – 59. [HOU Guohua, GAO Maosheng, DANG Xianzhang, et al. Water and salt sources and salinization of shallow saline groundwater in the coastal area of Yancheng, Jiangsu[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(4): 48 – 59. (in Chinese with English abstract)]
- [9] QI Huihui, MA Chuanming, HE Zekang, et al. Lithium and its isotopes as tracers of groundwater salinization: A study in the southern coastal plain of Laizhou Bay, China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 650(Pt 1): 878-890.
- [10] 苏永军, 范翠松, 赵更新, 等. 综合电法在探测海水入侵界面中的研究与应用——以莱州湾地区为例[J]. 物探与化探, 2020, 44(3): 704 – 708. [SU Yongjun, FAN Cuisong, ZHAO Gengxin, et al. Research and application of comprehensive electrical method in detecting saltwater intrusion interface: A case study of Laizhou Bay Area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(3): 704 – 708. (in Chinese with English abstract)]
- [11] KAZAKIS N, PAVLOU A, VARGEMEZIS G, et al. Seawater intrusion mapping using electrical resistivity tomography and hydrochemical data. An application in the coastal area of eastern Thermaikos Gulf, Greece[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 543: 373 – 387.
- [12] 董健, 曾献奎, 吴吉春. 不同类型海岸带海水入侵数值模拟研究进展[J]. 高校地质学报, 2018, 24(3): 442 – 449. [DONG Jian, ZENG Xiankui, WU Jichun. Advances in numerical simulation of seawater intrusion in different coastal zones[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2018, 24(3): 442 – 449. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王佳琪, 郭芷琳, 田勇, 等. 海水入侵模拟方法 VFT3D 及应用[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 184 – 194. [WANG Jiaqi, GUO Zhilin, TIAN Yong, et al. Development and application of sea water intrusion models[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 184 – 194. (in Chinese with English abstract)]
- [14] GUO Huaming, ZHOU Yinzhong, JIA Yongfeng, et al. Sulfur cycling-related biogeochemical processes of arsenic mobilization in the western Hetao Basin, China: Evidence from multiple isotope approaches[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(23): 12650 – 12659.
- [15] PEARCE A R, RIZZO D M, MOUSER P J. Subsurface characterization of groundwater contaminated by landfill leachate using microbial community profile data and a nonparametric decision-making process[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(6): W06511.
- [16] LEE E, SHIN D, HYUN S P, et al. Periodic change in coastal microbial community structure associated with submarine groundwater discharge and tidal fluctuation[J]. *Limnology and Oceanography*, 2017, 62(2): 437 – 451.
- [17] MCALLISTER S M, BARNETT J M, HEISS J W, et al. Dynamic hydrologic and biogeochemical processes drive microbially enhanced iron and sulfur cycling within the intertidal mixing zone of a beach aquifer[J]. *Limnology and Oceanography*, 2015, 60(1): 329 – 345.
- [18] SANG Shilei, DAI Heng, HU B X, et al. The study of hydrogeochemical environments and microbial communities along a groundwater salinity gradient in the Pearl River Delta, China[J]. *Water*, 2019, 11(4): 804.
- [19] ZHANG Xiaoying, MIAO Jinjie, HU B X, et al. Hydrogeochemical characterization and groundwater quality assessment in intruded coastal brine aquifers (Laizhou Bay, China)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(26): 21073 – 21090.
- [20] SREEKANTH J, DATTA B. Review: Simulation-optimization models for the management and monitoring of coastal aquifers[J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23(6): 1155 – 1166.
- [21] FAN Yue, LU Wenxi, MIAO Tiansheng, et al. Optimum design of a seawater intrusion monitoring scheme based on the image quality assessment method[J]. *Water Resources Management*, 2020, 34(8): 2485 – 2502.
- [22] ZHI Chuanshun, CAO Wengeng, ZHANG Zhuo, et al. Hydrogeochemical characteristics and processes of shallow groundwater in the Yellow River Delta, China[J]. *Water*, 2021, 13(4): 534.
- [23] NAIR I S, RAJAVENI S P, SCHNEIDER M, et al. Geochemical and isotopic signatures for the identification of seawater intrusion in an alluvial aquifer[J]. *Journal of Earth System Science*, 2015, 124(6): 1281 – 1291.
- [24] HAN Dongmei, SONG Xianfang, CURRELL M J, et al. Chemical and isotopic constraints on evolution of groundwater salinization in the coastal plain aquifer of Laizhou Bay, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 508: 12 – 27.
- [25] WERNER A D, BAKKER M, POST V E A, et al.

- Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 3 – 26.
- [26] GOEBEL M, PIDLISECKY A, KNIGHT R. Resistivity imaging reveals complex pattern of saltwater intrusion along Monterey coast[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 746 – 755.
- [27] 王亮,戴云峰,刘冰,等.基于等值反磁通瞬变电磁法快速探测海水入侵研究[J].*地球物理学进展*, 2023, 38(3): 1397 – 1407. [WANG Liang, DAI Yunfeng, LIU Bing, et al. Research on rapid detection of seawater intrusion based on opposing-coil transient electromagnetic method[J]. *Progress in Geophysics*, 2023, 38(3): 1397 – 1407. (in Chinese with English abstract)]
- [28] MIAO Tiansheng, LU Wenxi, LIN Jin, et al. Simulation of seawater intrusion and optimization of cutoff wall schemes based on surrogate model[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2019, 25(1/2): 297 – 313.
- [29] COBANER M, YURTAL R, DOGAN A, et al. Three dimensional simulation of seawater intrusion in coastal aquifers: A case study in the Goksu Deltaic Plain[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 464/465: 262 – 280.
- [30] 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)]
- [31] 汪美华,赵慧,倪天翔,等.近30年滑坡研究文献图谱可视化分析[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(4): 75 – 85. [WANG Meihua, ZHAO Hui, NI Tianxiang, et al. Visualization analysis of research literature map on landslides in the past 30 years[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(4): 75 – 85. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 严恺,梁其荀.海岸工程[M].北京:海洋出版社, 2002. [YAN Kai, LIANG Qixun. Coastal engineering[M]. Beijing: Ocean Press, 2002. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 许宁.中国大陆海岸线及海岸工程时空变化研究[D].北京:中国科学院大学, 2016. [XU Ning. Study on temporal and spatial changes of Chinese mainland coastline and coastal engineering[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 王庆兵,陈麟,支传顺等.不同海岸带地下水微生物群落结构与多样性差异研究[J/OL].*中国地质*, (2022-08-22) [2023-10-11] [WANG Qingbing, CHEN Lin, ZHI Chuanshun, et al. Difference study on microbial community structure and diversity of groundwater in different coastal zones[J/OL]. *Geology in China*, (2022-08-22) [2023-10-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220822.0958.004.html>. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 尹霞,许晓晴,王勋功,等.潮汐作用对黄河口滨海浅层地下水细菌群落结构的影响[J].*海洋环境科学*, 2022, 41(4): 526 – 533. [YIN Xia, XU Xiaoqing, WANG Xungong, et al. Tide effects on bacterial community structure in the shallow groundwater from Yellow River estuary[J]. *Marine Environmental Science*, 2022, 41(4): 526 – 533. (in Chinese with English abstract)]
- [36] WU Qinglong, ZWART G, SCHAUER M, et al. Bacterioplankton community composition along a salinity gradient of sixteen high-mountain lakes located on the Tibetan Plateau, China[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72(8): 5478 – 5485.
- [37] HUANG Xiaolin, LIN Juan, YE Xiuyun, et al. Molecular characterization of a thermophilic and salt- and alkaline-tolerant xylanase from planococcus sp. SL4, a strain isolated from the sediment of a soda lake[J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2015, 25(5): 662 – 671.
- [38] WEI Jiaming, CUI Lijuan, LI Wei, et al. Denitrifying bacterial communities in surface-flow constructed wetlands during different seasons: Characteristics and relationships with environment factors[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 4918.
- [39] ZHANG Yi, ALAM M A, KONG Xiaoying, et al. Effect of salinity on the microbial community and performance on anaerobic digestion of marine macroalgae[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2017, 92(9): 2392 – 2399.
- [40] ANANTHARAMAN K, BROWN C T, HUG L A, et al. Thousands of microbial genomes shed light on interconnected biogeochemical processes in an aquifer system[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13219.
- [41] KIM K, HEISS J. Methods in capturing the spatiotemporal dynamics of flow and biogeochemical reactivity in sandy beach aquifers: A review[J]. *Water*, 2021, 13(6): 782.
- [42] ADYASARI D, HASSEN RÜCK C, OEHLER T, et al. Microbial community structure associated with submarine groundwater discharge in northern Java (Indonesia)[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 590 – 601.
- [43] HÉRY M, VOLANT A, GARING C, et al. Diversity and

- geochemical structuring of bacterial communities along a salinity gradient in a carbonate aquifer subject to seawater intrusion[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, 90(3): 922 – 934.
- [44] HONG Yiguo, WU Jiapeng, WILSON S, et al. Vertical stratification of sediment microbial communities along geochemical gradients of a subterranean estuary located at the Gloucester beach of Virginia, United States[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 9: 3343.
- [45] CHEN Lin, ZHANG Jin, DAI Heng, et al. Comparison of the groundwater microbial community in a salt-freshwater mixing zone during the dry and wet seasons[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 271: 110969.
- [46] UNNO T, KIM J, KIM Y, et al. Influence of seawater intrusion on microbial communities in groundwater[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 532: 337 – 343.
- [47] CHEN Lin, HU B X, DAI Heng, et al. Characterizing microbial diversity and community composition of groundwater in a salt-freshwater transition zone[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 678: 574 – 584.
- [48] DEL CARMEN V G M, SOLA F, VALLEJOS Á. Comparative study of microbial diversity in different coastal aquifers: Determining factors[J]. *Water*, 2023, 15(7): 1337.
- [49] VALLERO M V G, HULSHOFF POL L W, LETTINGA G, et al. Effect of NaCl on thermophilic (55℃) methanol degradation in sulfate reducing granular sludge reactors[J]. *Water Research*, 2003, 37(10): 2269 – 2280.
- [50] 宋延静, 张晓黎, 付尧, 等. 滨海盐渍化土壤中氨氧化微生物丰度和多样性特征 [J]. 土壤, 2022, 54(6): 1157 – 1164. [SONG Yanjing, ZHANG Xiaoli, FU Rao, et al. Patterns of activity and community of ammonia oxidizers along salinity gradient in salinized soils[J]. *Soils*, 2022, 54(6): 1157 – 1164. (in Chinese with English abstract)]
- [51] 李寒, 张晓黎, 郭晓红, 等. 滨海盐渍化土壤中蓝细菌多样性及分布 [J]. 微生物学通报, 2015, 42(5): 957 – 967. [LI Han, ZHANG Xiaoli, GUO Xiaohong, et al. Diversity and distribution of cyanobacteria in coastal saline soils[J]. *Microbiology China*, 2015, 42(5): 957 – 967. (in Chinese with English abstract)]
- [52] ZHAO Qingqing, BAI Junhong, GAO Yongchao, et al. Shifts in the soil bacterial community along a salinity gradient in the Yellow River Delta[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(16): 2255 – 2267.
- [53] SANG Shilei, ZHANG Xiaoying, DAI Heng, et al. Diversity and predictive metabolic pathways of the prokaryotic microbial community along a groundwater salinity gradient of the Pearl River Delta, China[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 17317.
- [54] JIANG Shan, ZHANG Yixue, JIN Jie, et al. Organic carbon in a seepage face of a subterranean estuary: Turnover and microbial interrelations[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 725: 138220.
- [55] MA Zhonglin, GAO Long, SUN Mingxue, et al. Microbial diversity in groundwater and its response to seawater intrusion in Beihai city, southern China[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 876665.
- [56] MAZHAR S, PELLEGRINI E, CONTIN M, et al. Impacts of salinization caused by sea level rise on the biological processes of coastal soils : A review[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 909415.
- [57] 陈香, 李卫民, 刘勤. 基于文献计量的近 30 年国内外土壤微生物研究分析 [J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1458 – 1470. [CHEN Xiang, LI Weimin, LIU Qin. Bibliometric-based analysis of researches on soil microbes at home and abroad in the past 30 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(6): 1458 – 1470. (in Chinese with English abstract)]
- [58] FIERERER N, JACKSON R B. The diversity and biogeography of soil bacterial communities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(3): 626 – 631.
- [59] JACKSON C R, VALLAIRE S C. Effects of salinity and nutrients on microbial assemblages in Louisiana wetland sediments[J]. *Wetlands*, 2009, 29(1): 277 – 287.
- [60] SERRANO R. Salt tolerance in plants and microorganisms: Toxicity targets and defense responses[J]. *International Review of Cytology*, 1996, 165: 1 – 52.
- [61] SHAO Pengshuai, HAN Hongyan, SUN Jingkuan, et al. Salinity effects on microbial derived-C of coastal wetland soils in the Yellow River Delta[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 872816.
- [62] 桑石磊. 海水入侵对地下水水文地球化学及微生物群落的影响研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2019. [SANG Shilei. Effects of seawater intrusion on hydrogeochemistry and microbial communities of groundwater[D]. Guangzhou: Jinan University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [63] HUANG Shan, SHERMAN A, CHEN Chen, et al. Tropical cyclone effects on water and sediment chemistry and the microbial community in estuarine ecosystems[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 286: 117228.
- [64] FENG Lijuan, ZHANG Zeliang, YANG Guangfeng, et al. Microbial communities and sediment nitrogen cycle in a

- coastal eutrophic lake with salinity and nutrients shifted by seawater intrusion[J]. *Environmental Research*, 2023, 225: 115590.
- [65] XIONG Guiyao, ZHU Xiaobin, WU Jichun, et al. Seawater intrusion alters nitrogen cycling patterns through hydrodynamic behavior and biochemical reactions: Based on Bayesian isotope mixing model and microbial functional network[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 867: 161368.
- [66] SOLA F, DEL CARMEN V G M, VALLEJOS A. Interrelation prokaryotic community-aquifer in a carbonate coastal environment[J]. *Aquatic Sciences*, 2019, 82(1): 13.
- [67] POFFENBARGER H J, NEEDELMAN B A, MEGONIGAL J P. Salinity influence on methane emissions from tidal marshes[J]. *Wetlands*, 2011, 31(5): 831 – 842.
- [68] NEUBAUER S C, FRANKLIN R B, BERRIER D J. Saltwater intrusion into tidal freshwater marshes alters the biogeochemical processing of organic carbon[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(12): 8171 – 8183.
- [69] SEGARRA K E A, COMERFORD C, SLAUGHTER J, et al. Impact of electron acceptor availability on the anaerobic oxidation of methane in coastal freshwater and brackish wetland sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 115: 15 – 30.
- [70] GONG Shanggui, IZON G, PENG Yongbo, et al. Multiple sulfur isotope systematics of pyrite for tracing sulfate-driven anaerobic oxidation of methane[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 597: 117827.
- [71] PATHAK H, RAO D L N. Carbon and nitrogen mineralization from added organic matter in saline and alkali soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(6): 695 – 702.
- [72] TOBIAS C, NEUBAUER S C. Salt marsh biogeochemistry: An overview[M]//Coastal Wetlands. Amsterdam: Elsevier, 2019: 539-596.
- [73] WESTON N B, DIXON R E, JOYE S B. Ramifications of increased salinity in tidal freshwater sediments: Geochemistry and microbial pathways of organic matter mineralization[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2006, 111(G1): G01009.
- [74] 桑石磊, 黄柏强. 基于基因测序的地下咸水微生物多样性研究 [J]. 农技服务, 2021, 38(6): 104 – 106. [SANG Shilei, HUANG Baiqiang. Study on microbial diversity of underground salt water based on gene sequencing[J]. *Agricultural Technology Service*, 2021, 38(6): 104 – 106. (in Chinese)]
- [75] SELIVANOVA E A, POSHVINA D V, KHLOPKO Y A, et al. Diversity of prokaryotes in planktonic communities of saline Sol-Iletska Lakes (Orenburg Oblast, Russia) [J]. *Microbiology*, 2018, 87(4): 569 – 582.
- [76] 刘吉文, 刘姣, 黄付燕, 等. 海洋奇古菌门认知的拓展: 从新类群到新功能 [J]. 微生物学报, 2022, 62(12): 4628 – 4645. [LIU Jiwen, LIU Jiao, HUANG Fuyan, et al. The expanding knowledge of marine Thaumarchaeota: From new groups to new functions[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2022, 62(12): 4628 – 4645. (in Chinese with English abstract)]
- [77] HUANG Wencong, LIU Yang, ZHANG Xinxu, et al. Comparative genomic analysis reveals metabolic flexibility of Woesearchaeota[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5281.

编辑: 宗 爽