

# 海水垂向入侵问题研究进展

何岚轩<sup>1</sup>, 杨 蕴<sup>2</sup>, 宋 健<sup>2</sup>, 俞 烜<sup>3</sup>

(1. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 3. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210018)

**摘要:** 随着全球气候变暖, 风暴潮在沿海地区的频率和强度均可能增长, 由此引发的海水垂向入侵可能会造成大面积的含水层淡水咸化。同时, 由人类活动引起的沿海虾塘咸水养殖规模日益增长, 由此引发的咸水垂向入侵可能会导致沿海地区地下水水质及生态环境的恶化。虽然已有一部分学者在海水(咸水)垂向入侵的研究中取得了成果, 但由于海水(咸水)垂向入侵过程复杂, 其对地下水咸化及恢复规律依然有待深入研究。文章阐述了海水垂向入侵的危害及前人的研究办法, 总结了他们的研究成果并得出了海水垂向入侵的影响因子, 指出了洪水和养殖活动对沿海地区含水层的威胁。得出的结果如下: 研究海水垂向入侵常用的方法包括室内试验和数值模拟; 海水垂向入侵主要与地形地貌、含水层性质和水文气象条件有关; 虾塘养殖等人类活动可能会成为垂向咸水入侵的潜在来源。建议未来在海水垂向入侵研究中将多种现场观测实验方法结合起来。数值模拟应注重与现场观测实验数据相互验证, 模型简化的方式有必要仔细考虑。虾塘养殖等人类活动可能造成的垂向咸水入侵问题应更多地受到关注。

**关键词:** 沿海含水层; 海水(咸水)入侵; 风暴潮; 虾塘养殖; 水资源; 地下水咸化

**中图分类号:** P641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2024)1-0085-13

**DOI:** 10.11759/hyxx20230411003

沿海地区拥有丰富的资源, 同时海上贸易和交通运输便利<sup>[1]</sup>, 因此全球约 40% 的人口居住在海岸线 100 公里以内的沿海地区<sup>[2-4]</sup>。沿海地区的人口增长率和城市化率也高内陆地区, 预计未来几十年沿海地区人口将大幅增加<sup>[5-7]</sup>, 从而使得沿海地区人均淡水资源量面临减少的压力。有些沿海地区的淡水资源依赖于含水层<sup>[3, 8]</sup>。未来情景下, 这种依赖性可能日益增强<sup>[9]</sup>。然而, 沿海含水层非常脆弱, 其地下淡水资源极易受到海水入侵的威胁<sup>[10-12]</sup>。

海水入侵是沿海地区长期存在的问题, 它会影响沿海含水层淡水资源的质量和储量<sup>[13-14]</sup>。一般定义为: 当海水与淡水之间的水动力平衡被破坏, 导致咸淡水界面向陆地方向移动的现象<sup>[15-20]</sup>。通常情况下, 海岸带地下水水位自陆地向海洋方向倾斜。陆地地下水向海洋补给排泄, 保持相对稳定的状态。此时, 滨海地带比重较小的地下淡水浮托在比重较大的海水或咸水之上, 二者间形成宽度不等、基本稳定的过渡带。气候干旱或人为开采可能破坏这种平衡状态, 咸淡水过渡带就要向陆地方向移动, 于是就发生了海水入侵。这一入侵过程多呈横向, 即从海洋向陆地。

近年来, 由热带气旋引发的风暴潮导致沿海洪水事件频发。这些洪水下渗, 会使含水层受到海水垂向入侵。尤其是许多低洼易受淹没的沿海地区, 形成了难以恢复的海水垂向入侵区<sup>[5, 21]</sup>。同时, 全球气候变暖可能会加剧海水垂向入侵对沿海含水层的污染程度<sup>[3, 22-23]</sup>。随着气候变暖, 海平面会逐渐上升, 这会导致海水横向入侵含水层体积增大、减少可用淡水资源<sup>[24-26]</sup>, 而且预计会出现更频繁更强烈的热带风暴<sup>[6, 9, 27-31]</sup>、增加了洪水事件频率和强度<sup>[32-34]</sup>、扩大海水淹没范围和深度、造成更加严重的海水垂向入侵现象。由于海水垂向入侵具有突发性, 不仅威胁大面积沿海含水层的地下淡水资源, 还会使沿海地区的植被向内陆退缩<sup>[35-36]</sup>、威胁农作物生长<sup>[37]</sup>。

收稿日期: 2023-04-11; 修回日期: 2023-07-07

基金项目: 广东省水利科技创新项目(2020-27); 广东省“珠江人才计划”创新团队项目(2019ZT08G090); 国家重点研发计划项目(2021YFC3001000) [Foundation: Guangdong Water Conservancy Science and Technology Innovation Project, No. 2020-27; Guangdong Province “Pearl River Talent Program” Innovation Team Project, No. 2019ZT08G090; National Key R & D Program Projects, No. 2021YFC3001000]

作者简介: 何岚轩(1998—), 男, 广东惠州人, 硕士研究生, 研究方向为海水入侵, E-mail: hlx292419646@163.com; 俞烜(1985—), 通信作者, 男, 陕西汉阴人, 副教授, 研究方向为海水入侵, E-mail: yuxuan@issas.ac.cn

除了沿海洪水等自然因素,人类活动(如水产养殖)有可能引发海水(咸水)垂向入侵。全球水产养殖规模在过去 50 年急剧增长,比其他的粮食生产系统都要快<sup>[38-41]</sup>。在经济效益的驱动之下,水产养殖中的虾塘扩张尤为突出。虾养殖场中咸水池塘的咸水可能会渗入地下,造成含水层的海水垂向入侵<sup>[42-43]</sup>。

尽管过去已有大量研究工作致力于深入理解沿海含水层的地下水流动和溶质运移过程,但沿海含水层的海水垂向入侵仍难以刻画。在很多沿海地区,由于含水层的监测网络不足,模型模拟结果难以与实测数据匹配,确定地下水质量和储量变得困难<sup>[14, 20]</sup>。鉴于未来沿海含水层可能会更容易受到沿海洪水和咸水池塘的影响,迫切需要加强对沿海地区地下水及溶质迁移规律的研究,为政策制定者提供科学依据,制定有效的应对措施,以缓解含水层淡水资源的咸化问题<sup>[8, 25, 44]</sup>,有效保护当地淡水资源。本文综述了海水垂向入侵的危害及研究进展,指出海水垂向入侵是一个应当被重视并深入探究的问题。

## 1 海水横向入侵与海水垂向入侵

按照海水进入含水层的主要方向,海水入侵可分为海水横向入侵和海水垂向入侵。海水横向入侵主要是由于抽水、土地利用变化、气候变化或海平面上升引起的陆海梯度变化所致。而当沿海洪水灾

害发生或虾塘蓄集海水,海水便从地表垂向侵入沿海含水层,造成海水垂向入侵<sup>[45]</sup>,如图 1 所示。

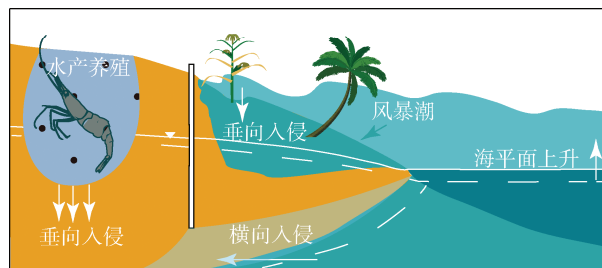


图 1 海水横向入侵和垂向入侵示意图

Fig. 1 Schematic lateral and vertical seawater intrusions

海水横向入侵在沿海含水层中比较常见,由自然因素(海平面上升<sup>[19, 26, 29, 46]</sup>、潮汐<sup>[47-51]</sup>)和人类活动(地下水抽取<sup>[52-55]</sup>、海水入侵屏障<sup>[56-60]</sup>、水库<sup>[61-62]</sup>)引起的海水横向入侵已经受到广泛地研究<sup>[45, 63]</sup>,然而海水垂向入侵却较少被关注。如图 2 和图 3 所示,海水垂向入侵的研究地点在全球范围内分布有限,主要集中在飓风频发的美洲和欧洲部分地区,以及曾经发生过重大海啸灾害的印度东南部、斯里兰卡和日本等地。此外,水资源极度短缺、地势低洼的环礁岛发生的海水垂向入侵也备受关注<sup>[64-65]</sup>。但是,在其他拥有长海岸线的地区,如拥有长达 18 000 km 海岸线的大陆<sup>[66]</sup>,以及非洲和南美洲等地,相关的水海垂向入侵研究案例相对稀少。

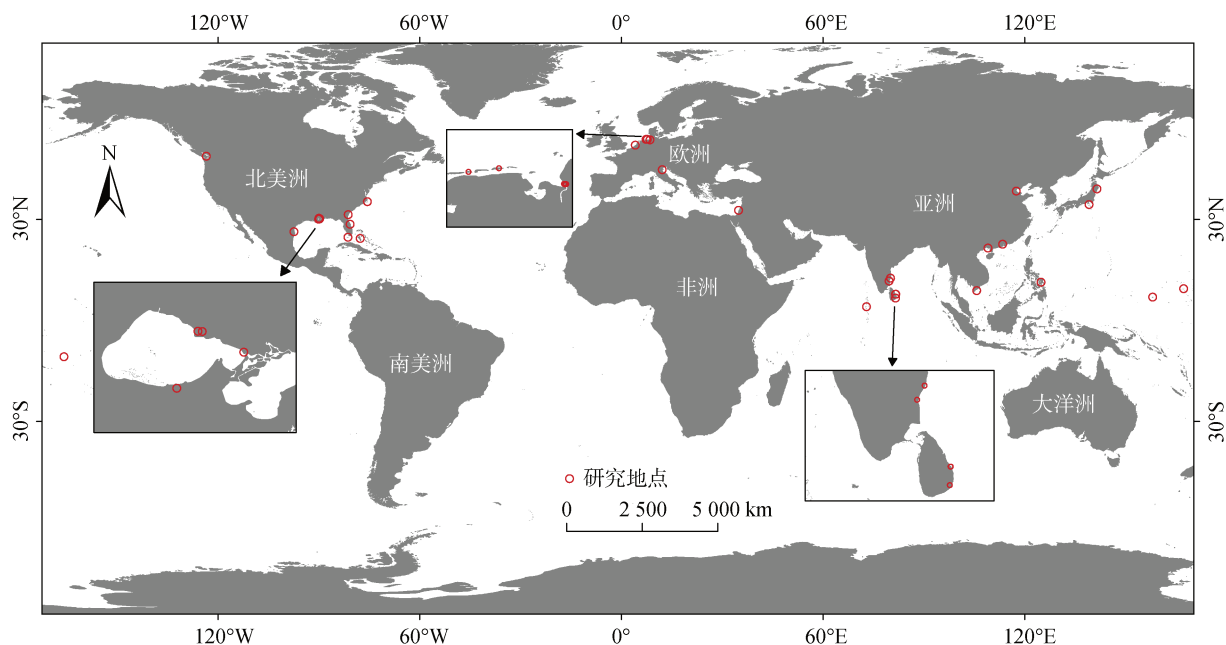


图 2 全球海水垂向入侵研究地点分布图

Fig. 2 Global distribution of vertical seawater intrusion study sites

注: 本图数据来源于作者阅读的参考文献中近年研究案例<sup>[3, 8-9, 12, 14, 22, 25, 41, 43, 64, 69-71, 75, 77, 79, 85, 92-94, 96-97, 99, 104]</sup>

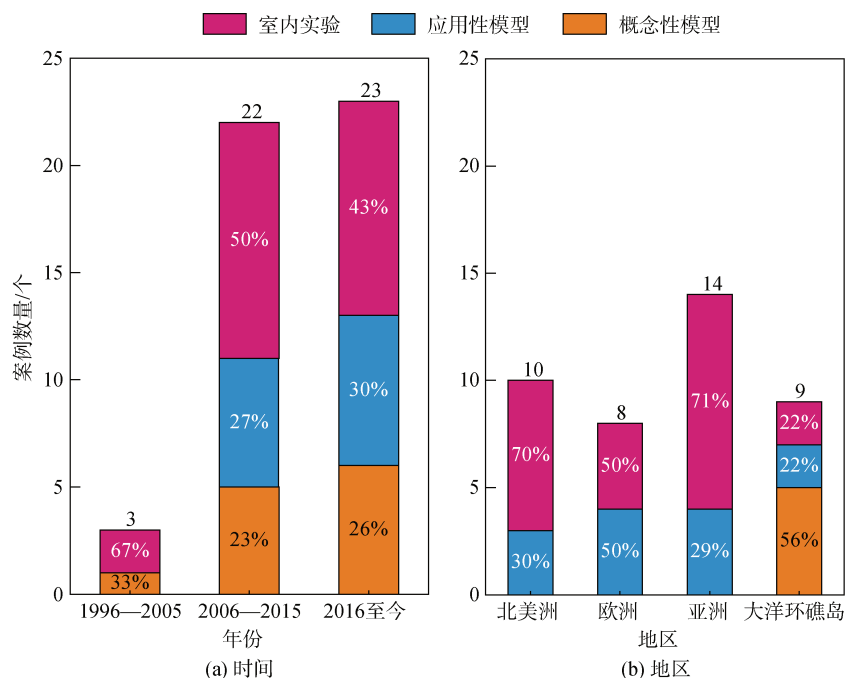


图 3 不同研究办法根据时间和地区划分的研究海水垂向入侵的案例数

Fig. 3 Number of vertical seawater intrusion cases studied using different research approaches

注：横坐标“时间”、“地区”为研究案例的时间以及研究地点；图例中“应用性模型”指在特定地区使用实际边界模型模拟海水垂向入侵的研究案例；“概念性模型”指使用概念化的模型(未使用实际边界)模拟海水垂向入侵的研究案例；“室内实验”为通过观测检测方法、电阻率层析成像和示踪剂等非数值模拟的方法研究沿海洪水引发海水垂向入侵的案例；本图数据来源于作者阅读的参考文献中近年部分研究案例

## 2 沿海洪水导致的海水垂向入侵

世界上每年发生很多起由风暴潮引起的沿海洪水事件<sup>[67]</sup>。由于地貌与地质条件不同，其导致海水垂向入侵的形成机制相当复杂。通常情况下，热带气旋等天气事件引发风暴潮后，海水水位升高并越过海岸防护工程(如沙丘和防波堤)，或海水过度冲刷防护工程并导致其溃坝，从而使海水快速淹没地表，形成数小时至数天的大面积洪水<sup>[3, 37]</sup>。在淹没初期，海水从地表渗透到地下，由于密度差异，渗透的海水发生了密度驱动的对流，从而形成盐羽流，通过包气带在垂直方向与淡水混合<sup>[3, 68-69]</sup>。随后，向下移动的盐羽流因分散而变宽，其与新鲜地下水的密度差降低，从而减小了盐羽流下沉的速率<sup>[25]</sup>。此外，海水可以通过开放井或沟渠直接进入地下，并导致海水释放到周围含水层中，使地下水咸化<sup>[5, 69-70]</sup>。部分海水可以通过开放井绕过表层的非承压含水层，污染更深层的承压含水层<sup>[9]</sup>。如果是沿海城市，沿海洪水还会对城市中许多供水井造成物理破坏<sup>[5]</sup>。在海水渗透含水层后，许多模型模拟表明，由于地表淡水的补给和雨水的补给，咸化后的地下水中的盐分会下沉，并释放到海水或周

围水体，最终淡水透镜体恢复到原来的形态<sup>[45, 70-71]</sup>，这就是含水层咸化后的自然恢复。当海水扩散到较深处时，盐羽流的密度逐渐下降，密度驱动的垂直流效应减弱，加之咸水在深层的迁移速率减慢，含水层通常需要数年至数十年才能自然恢复至原状<sup>[3, 25, 72]</sup>。在一些沿海地区，蒸发还会加剧土壤的含盐量，使咸化的地下水更加难以恢复<sup>[73-74]</sup>。沿海洪水引发垂向入侵的过程复杂，且具有突发性，因此对其研究相对滞后，限制了人们对沿海洪水事件导致的海水垂向入侵的认识与防范，使沿海洪水事件对沿海地区产生许多危害。

### 2.1 洪水引发的海水垂向入侵的研究方法

观测检测方法是研究海水垂向入侵的重要办法，许多研究者通过在水井中埋设记录仪器<sup>[64, 69]</sup>(通常是电导率-温度-深度测井仪)，或者从水井中抽取水样并检验水质<sup>[5, 75]</sup>，以观察海水垂向入侵以及恢复过程。Illangasekare 等<sup>[69]</sup>通过记录仪器监测斯里兰卡东海岸贸易区的三口井的盐度数据，发现三口井的盐度数据都在 2004 年大海啸后有显著提升。同时，还对水井抽取水样进行化学分析，发现地下水硝酸

盐的浓度在海啸后几个月内显著增加。Carlson 等<sup>[5]</sup>在飓风前后通过对一口研究井进行了水泵抽水和净化实验,发现所有化学指标均表明卡特里娜和丽塔飓风引发的风暴潮期间,咸水入侵了研究井。同样是在卡特里娜和丽塔飓风引发的风暴潮期间前后, Van Biersel 等<sup>[75]</sup>也通过对研究井水泵抽水与水质检验实验,发现飓风之后地下水氯化物浓度立即升高,随后下降至风暴前的值,水井中的所有指标均有改善。这种通过在观测井中埋设仪器或抽水检测水质的实验方法可以获得较高时间分辨率的地下水盐度及温度数据,但空间分辨率较低,只能获取含水层中特定地点的数据,难以了解海水垂向入侵导致的含水层咸化的整体分布。此外,在风暴频发的沿海地区,地下水井和仪器也有被破坏的风险。

除了记录仪器,电阻率层析成像(ERT)也是研究海水垂向入侵的一种广泛的工具<sup>[76]</sup>,有学者通过这种方式研究风暴潮对含水层的海水垂向入侵作用<sup>[8, 77]</sup>。Kiflai 等<sup>[77]</sup>通过 ERT 方法收集了发生在佛罗里达群岛的飓风艾玛引发的风暴潮前后的三个剖面的电阻率层析图像,发现风暴潮影响了所有三个剖面的淡水透镜体的盐度,其中低海拔地区的剖面盐度增加最为明显。Huizer 等<sup>[8]</sup>运用 ERT 方法将荷兰砂机电阻率转化为盐度图像,并用地下水模型再现观测得数据,发现海岸线形态变化和波浪爬升对地表淹没产生强烈影响。电阻率层析成像技术曾被广泛应用于海水横向入侵的研究,也可应用于海水垂向入侵,它可以反演出含水层中的盐度数据,并生成较高分辨率的盐度图像,从而更准确地定量分析地下水流动和盐度分布。相比于传统地下水采样和监测方法,它具有非侵入性,可避免地下水资源的浪费。因此,ERT 方法适合用于预测风暴潮引起的海水垂向入侵和地下淡水透镜体的变化。但它获取的数据时间分辨率低,无法观察到较为连续时间的盐度变化。同时,由于地下含水层通常具有非均质性和复杂性,所获取的数据较难解释。因此,还可考虑通过对监测井使用电磁技术(EM),对 ERT 方法生成的盐度图像数据进行校准,提高数据的可靠性<sup>[78]</sup>。

示踪剂技术已广泛应用于研究海岸带的地下水及溶质运输。确定地下水咸化的来源通常具有挑战性,但同位素示踪已被证实能够有效识别地下水的来源和过程<sup>[79]</sup>,例如镭同位素被广泛应用于海底地下水排放(SGD)的研究<sup>[80]</sup>。此外,热也可作为示踪剂,

使用热示踪能更好地理解沿海含水层地下水与海水交互作用,如 Gilfedder 等<sup>[81]</sup>使用温度探测技术和热传输计算方法,绘制了潮间带地区水的渗透和渗出通量,以及追踪地下水排放时的垂直水通量<sup>[82]</sup>。示踪剂技术能有效识别地下水的来源与运移过程,定量评估海岸带地表水和地下水的交换及溶质的迁移,具有较高的分辨率和准确性。但这种技术的应用较多局限在海水横向入侵的研究,未来应更多地应用在海垂向入侵中。例如,可通过对锶同位素追踪洪水发生后海水在地下的渗透路径、利用地下观测井进行同位素的示踪,同位素追踪技术可能还可以确定地下水和海水垂向入侵中的海水的混合比例、海水在地下中的流速等,从而更好地理解盐水在渗入沿海含水层后的运移规律及含水层恢复过程中盐分去向及恢复规律。

不同于观测检测方法,数值模拟方法可以更好地认识、理解和预测海水入侵过程,为相关部门提供科学决策和有效管理手段,实现海岸带地下水资源的可持续利用和保护<sup>[45, 67]</sup>。随着计算机的发展,数值模拟被广泛用于海水垂向和横向入侵研究,它能刻画海水入侵过程及咸淡水界面的形态。应用在海垂向入侵常用的数值模型及数值代码通常有: SUTRA 模型、FEFLOW 模型、SEAWAT 模型、HGS 模型等。Chui 等<sup>[83]</sup>通过二维 SUTRA 模型探究不同海平面上升速率对不同环礁岛大小的淡水透镜体的影响,并通过对比不同大小和形状的环礁岛淡水透镜的模拟结果,来分析岛屿尺寸和形状对淡水透镜变化的影响。Liu 等<sup>[84]</sup>利用三维 FEFLOW 模型模拟了不同海啸高度情况下海水垂向入侵的严重程度和含水层恢复时间,发现海啸高度越高,含水层含盐量越高,含水层恢复时间越长。Holding 等<sup>[70]</sup>通过 HGS 模型,研究风暴潮导致地下水咸化后,补救措施的实施及时与否对咸化后的地下水恢复原状的时间的影响。Xiao 等<sup>[85]</sup>建立了参考 SEAWAT 模型和诊断 SEAWAT 模型,以风暴潮发生前后作为初始条件,比较两个模拟结果评估风暴潮对含水层咸化的影响。

目前沿海洪水导致海水垂向入侵过程的建模存在以下困难:

(1)海水垂向入侵涉及多个过程,包括泥沙搬运、溃坝、地下水含水层、内陆海水地表径流及海水向地下渗透等过程<sup>[3]</sup>。虽然大多数数值模拟研究已经涉及其中一个或几个过程,但难以重现沿海洪水

海水垂向入侵的整个过程,导致预估海水垂向入侵的效果可能存在不准确性。

(2)沿海地区地下盐度数据往往难以获取,只能通过观测井的盐度进行模型参数的校准<sup>[27]</sup>,并且很多模型仅能进行概念化模拟。如图3所示,根据收集的沿海洪水引发的海水垂向入侵数值模拟研究案例,其中有一半的案例是概念化模型研究。尽管能从概念化模型中获取一定的信息,但在缺乏可与模型结果对比的数据的情况下,模型模拟的准确性和可信度可能较低。

(3)由于海水垂向入侵涉及范围广,地质地貌参数难以获取。因此模型常将含水层简化为均质的,地形也多为简单斜面。这些模型简化将会牺牲模拟结果的准确性,忽略某些过程可能带来不同结论<sup>[70, 85-86]</sup>。

## 2.2 沿海洪水引发的海水垂向入侵的影响因子

通过综合分析前人对沿海洪水引发的海水垂向入侵的研究,我们发现海水垂向入侵对地下水咸化及后续恢复的影响主要和三个方面有关——地形地貌、含水层性质和水文气象条件(如降水)。

地形地貌是影响由风暴潮引起的海水垂向入侵的因素之一。根据地形地貌的不同,沿海洪水可能会渗入地面、流向海岸或在洼地中沉淀并渗透<sup>[77]</sup>。Bilskie 等<sup>[32]</sup>研究了海平面上升和沿海洪水对于沿岸地形的影响,以及地形变化对海平面上升和洪水影响的作用。研究表明,地形变化会影响沿海洪水的深度和分布。此外,地形变化还会影响海水在地下水中的运动和分布,从而影响沿海地下水的盐度分布。Yu 等<sup>[87]</sup>应用 HGS 模型,在合成地形和真实地形上模拟了风暴潮条件下的海水入渗量,研究地形对风暴潮引发海水垂向入侵的影响,发现地表洼地和地表水流连通性是控制地下水咸化和降水冲刷的主要因素,地表洼地增加了海水入渗量,从而使含水层恢复所需时间变长,地表连通性则控制了地表淹没程度和盐化含水层体积。地形地貌通过改变风暴潮的流动路径、改变淹没面积和改变海水积水时间,对海水垂向入侵对地下水咸化过程和后续含水层的恢复过程产生重要影响<sup>[71]</sup>。

含水层性质影响海水垂向入侵发生后的地下水及溶质运移规律与扩散,风暴潮引发的海水入侵通常与含水层厚度<sup>[68, 84]</sup>、地质异质性<sup>[88-89]</sup>、水力梯度和水力传导率( $K$ )<sup>[68, 90]</sup>等含水层性质有关。Vithanage 等<sup>[88]</sup>

通过水槽实验和数值模拟研究地质非均质性对海啸造成的海水垂向入侵的影响,研究结果表明,地质异质性对地下水盐化和冲刷时间具有重要影响。具有随机分布小通道的含水层中,盐度的升高速度比其他含水层快,且需要更长时间才能将含水层的盐度降至低盐度水平。而在具有单一连续通道的含水层中,盐度的升高速度较慢,但由于通道的存在,盐分可以更快地被冲刷出去,含水层恢复所需时间变短。Yang 等<sup>[90]</sup>通过 HGS 模型模拟研究不同水文地质因素对垂直海岸含水层上海水淹没的影响,发现含水层对海水淹没的脆弱性随着水力梯度增高而降低、随着渗透性各向同性的增加而增加。Bailey 等<sup>[91]</sup>通过数值模拟检验多含水层水力传导率  $K$  对西太平洋环礁岛海水淹没事件后含水层恢复时间的影响,发现  $K$  值越高,含水层咸化后的恢复速率越快。Zheng 等<sup>[74]</sup>观测了季节与小时尺度滨海湿地公园的土壤盐分,发现短期内蒸发无法引起盐分的增加,洪水也无法将盐分淋洗至土层深处。Song 等<sup>[89]</sup>研究发现,在单次风暴潮引发的海水垂向入侵事件中,与等效均质含水层相比,含水层中连通的非均质性降低了最大含盐程度和盐分垂向侵入距离,缩短了含水层恢复时间。含水层性质通过改变海水入渗速率与入渗路径影响海水垂向入侵地下水咸化过程及恢复时间。

水文气象条件是含水层恢复的主要因素,它决定了海水垂向入侵发生后含水层经过多长时间才能恢复原状<sup>[68-69, 88, 92-94]</sup>。含水层遭受污染后,干旱时土壤蒸发强烈,土壤水分降低,土壤的盐渍化加剧。然而,在雨季时,更多的降水渗入含水层,减少土壤中的盐分积累<sup>[95]</sup>。Bailey 和 Jenson<sup>[91]</sup>发现,被咸化的环礁岛含水层在过渡季(如4月)或雨季(7月)淡水透镜体恢复时间比旱季更快恢复。次年发现,降水量较高的岛屿恢复时间可能会缩短1~2个月<sup>[65]</sup>。Kaihatsu 等<sup>[96]</sup>通过供水井埋设仪器,监测日本东北大地震引发海水垂向入侵后地下水的恢复,发现降雨对含水层的恢复很有效。Gingerich 等<sup>[97]</sup>通过三维数值模型模拟环礁岛淡水透镜体被咸化后的恢复情况,发现如果海水垂向入侵发生在雨季开始时淡水透镜体的恢复期要比在旱季发生时的恢复期要短25%(5.5个月)。Kifflai 等<sup>[77]</sup>通过电阻率层析成像(ERT)研究飓风艾玛对佛罗里达群岛的淡水透镜体的影响,发现在低海拔地区降水对淡水透镜体的恢复有明显的作用。水文气象条件决定地表淡水补给量及蒸发量,进而影响海水垂向入侵后的恢复时间。

## 2.3 沿海洪水引发的海水垂向入侵的防范

在全球变暖和海平面上升的背景下,频繁发生的风暴事件加大了沿海地区受海水垂向入侵影响的风险,因此,加强海岸管理、修建堤坝和地下排水管道等措施以抵御海水垂向入侵是非常重要的<sup>[98]</sup>。在风暴潮到来之前,最常应用的抵御风暴潮的方法是在海岸线修建堤坝、防波堤等工程来防止海水倒灌并保护农田等土地不被海水淹没<sup>[37, 99]</sup>。但这些措施成本较高,还有一种更经济有效的措施,即加高、拓宽现有砂质海滩,以阻挡风暴潮引起的增水<sup>[98]</sup>。另外,可以考虑铺设地下管道等排水设施,从浅层土壤中排放盐分,以提高含水层脱盐效率<sup>[73]</sup>。Elsayed 等<sup>[3]</sup>通过耦合 XBeach 和 SEAWAT 模型研究在加入排水系统后对咸化含水层的恢复作用,发现修建地下排水系统可以使盐水在进入深层含水层之前被有效吸收,缩短含水层恢复所需的时间。

在海水垂向入侵事件发生后,及时处理淹没和入渗的海水以及人工补给淡水等措施对于加快含水层的恢复也非常重要。当风暴潮引发洪水进入沟渠和开放井后,及时排放海水能加快含水层的恢复,排放得越及时,含水层的恢复会越快。但是,如果排放不及时,则几乎不会加快含水层的恢复<sup>[70]</sup>。对于在环礁岛发生的海水垂向入侵事件,事件发生后应尽可能从中央沼泽洼地中抽出停滞的海水,以免咸水侵入较深的含水层<sup>[100]</sup>。为了加快含水层的恢复速度,可以通过人工补给淡水的办法可以加速咸化含水层的恢复。Gingerich 等<sup>[97]</sup>通过对马绍尔群岛共和国的一处环礁岛进行三维数值模拟和水文观测分析岛屿的水文如何恢复,结果表明,淡水透镜体被咸化后,人工对含水层补给捕获的雨水可以缩短淡水透镜体的恢复期。需要注意的是,一些用于防治海水横向入侵的措施可能并不适用于海水垂向入侵,例如通过抽取井水来清除海水,适度抽水去除海水可能是有效的,但过度抽水会使咸淡水界面上升,含水层盐度上升<sup>[3, 96, 101]</sup>。Vithanage 等<sup>[93]</sup>对比了抽水和不抽水对含水层地下水盐度恢复的影响,发现强化抽水方法并没有达到加快淡水恢复的预期效果,反而可能延长了含水层恢复的时间。因此,应减少对含水层的扰动,减少抽水,过度的抽水会导致淡水透镜体缩小,削弱含水层稀释盐水的能力,减缓含水层恢复速率<sup>[27, 71]</sup>。

最后,让沿海居民撤离到内陆也是一种选择。在一些社会政治环境不利于防治海水垂向入侵的受影响

地区,需要权衡维护抵御海水垂向入侵的系统与人口迁移的成本等因素,将人口迁移至内陆也是值得考虑的措施<sup>[67]</sup>。同时,唤起公众与管理者的意识也很重要。2004 年和 2011 年发生海啸时,在对海啸会造成海水垂向入侵知之甚少的情況下,大面积的含水层被咸水侵入,使灾后救济和重建工作增加了巨大负担<sup>[84]</sup>。

## 3 沿海虾塘导致的海水垂向入侵

沿海地区虾塘的咸水养殖会引发可能的环境问题。池塘养殖是古老且传统的水产养殖形式<sup>[102]</sup>,而最常见的虾塘养殖技术是集约化对虾养殖,即在封闭或半封闭的系统中以极高密度养殖对虾。这种养殖周期短,产品价值高<sup>[39]</sup>,对提高农民收入及提高水产养殖部门的粮食生产效率起到重要作用<sup>[102]</sup>。由于全球对于对虾的持续需求<sup>[2, 43, 103]</sup>,以及淡水供应压力越来越大,未来的水产养殖发展可能会利用更丰富的咸水与海水资源<sup>[38]</sup>,使得对虾的养殖规模越来越大<sup>[104]</sup>。当咸水池塘位于淡水含水层上方时,含水层有可能被池塘咸水污染<sup>[63, 105]</sup>。通常,虾塘咸水养殖中池塘的底部没有铺设塑料布防渗,或防渗材料因长时间使用,导致防渗效率低下。此外,在海水(咸水)养殖过程中需要向池塘投入含有营养性物质和抗生素,这些物质可能渗入池塘底部并使地下潜水甚至承压水咸化<sup>[79, 105]</sup>。但很少有人关注到咸水池塘废水对池塘底部含水层的影响<sup>[41]</sup>,有关这方面的研究仍处于初步阶段。

### 3.1 沿海虾塘引发的海水垂向入侵的研究办法

目前,研究虾塘引发的海水垂向入侵的方法主要有数值模拟方法和同位素示踪法等。数值模拟方法通常将虾塘概化为一个长方体,并设定相应的咸水水深,以评估咸水养殖对沿海含水层的影响<sup>[43, 106]</sup>。但实际情况往往与模型情景有较大偏差。未来可考虑通过卫星影像识别沿海虾塘的位置及面积<sup>[107]</sup>,使模型更接近实际情况。同时,应加强对虾塘含水层地下盐度的监测,对模型参数进行校正。同位素示踪剂技术通常与水化学方法结合。通过对虾塘池水进行同位素示踪,一段时间后,对养殖场场区的观测井采取水样分析,以识别虾塘养殖对沿海含水层地下水咸化的影响及机制<sup>[41, 79]</sup>。

有许多人类活动和虾塘咸水养殖类似,也可能造成含水层的污染。例如,循环水(经过处理的废水)越来越多地用于补给地下水<sup>[108-109]</sup>、农业微咸水灌溉

也可能导致含水层的污染<sup>[110]</sup>。陈丽娟等<sup>[111]</sup>使用数值模型模拟了微咸水灌溉条件下土壤盐分积累趋势,发现土壤表层含盐量随着灌溉水矿化度的增大而增加,但黏土夹层对土壤盐分运移有阻碍作用。张美桃等<sup>[112]</sup>进行了不同灌溉水量及盐分情景进行大田试验,发现 5.0 g/L 微咸水灌溉处理 0~100 cm 土层土壤平均含水量及电导率相比 1.1 g/L 地下水灌溉处理显著增加。微咸水灌溉虽然节约了灌溉水量,但也造成土壤不充分淋洗,并引发土壤次生盐渍化<sup>[113]</sup>。虾塘引发的海水垂向入侵过程与微咸水灌溉过程类似,可以借鉴微咸水灌溉研究方法,例如,在虾塘附近含水层架设土壤水盐监测站,对土壤水盐进行长时间序列的监测,以确定虾塘的咸水养殖对表层土壤盐分的影响。还可参考 Illangasekare 等<sup>[69]</sup>和 Vithanage 等<sup>[88]</sup>,构建物理模型,更直观地观察到虾塘咸水养殖对深层含水层地下水咸化的影响。

### 3.2 沿海虾塘引发的海水垂向入侵的影响因素

影响虾塘咸水养殖引发的海水垂向入侵的因素有很多。池塘尺寸、水深和咸水的盐度影响海水垂向入侵过程、含水层恢复速率和海底地下水排放(SGD)。Hou 等<sup>[43]</sup>采用数值模拟方法研究咸水池塘养殖管理场景,探讨了咸水池塘盐度、水深和养殖场宽度对沿海地下水咸化区域面积、海底地下水排放和含水层恢复速率的影响。结果显示,水深控制盐渗透量,养殖场宽度控制含水层恢复速率,池塘水盐度和深度会影响 SGD。含水层性质也可能影响海水垂向入侵过程。黎清华<sup>[79]</sup>发现,含水层中隔水层对咸水养殖向含水层中渗透的盐水有阻滞作用。厚黏土覆盖地区更难受到海水垂向入侵影响。Tal 等<sup>[41]</sup>发现,咸水养殖会导致地下水咸化,但薄黏土层可抑制海水垂向入侵。因此,在虾养殖活动中,应在池塘底部铺设不易渗水的黏土,减少盐分下渗至池底含水层。虾塘养殖应考虑生产管理方案,如池塘宽度与深度、虾种选取、虾塘水盐度等。同时,应加强对虾塘附近含水层的实地考察,选择合适位置进行水产养殖活动。

## 4 结论与展望

近年来,学术界逐渐认识到海水垂向入侵对沿海地区的危害,并已取得了一定的研究成果,本文聚焦海水垂向入侵,梳理了国内外主要文献资料。海水垂向入侵对海岸带有恶劣影响,它会使地下淡水

资源咸化,使沿海人类的饮用水资源受到威胁;会使农田土壤盐渍化,农作物产量降低,海岸带植被向内陆退化,对当地生物多样性产生负面影响;此外,海水垂向入侵还会导致海底地下水排放(SGD)的增加,加剧沿海地区水质的恶化。因此,研究海水垂向入侵的影响机理和过程,为当地政府和环境保护机构提供重要的科学依据,以制定更有效的地下水资源和水生态的保护措施,对于保护沿海地区的水资源、沿海地区的生态环境和生物多样性具有重要的意义。对于沿海洪水引起的海水垂向入侵,研究方法主要包括数值模拟和室内实验。在虾塘引发的海水垂向入侵方面,数值模拟方法被广泛应用。未来的研究可参考沿海洪水引起的海水垂向入侵以及微咸水灌溉等领域的研究方法,以丰富研究结果。目前的研究结果表明,海水垂向入侵受到地形地貌、含水层性质、水文气象条件、池塘尺寸和咸水盐度等因素的影响。

尽管学术界对于海水垂向入侵有了一定的认识,但为了深入掌握海水垂向入侵对海岸带的影响,建议在以下几个方面深入研究:

1)结合多种实验方法,提高时间分辨率的同时,提高空间分辨率。

虽然许多学者已经应用多种实验方法研究海水垂向入侵,但很少有人结合不同的实验方法,通常,单一的现场实验数据往往只能实现单方面的高精度测量(如时间分辨率,纵向分辨率和横向分辨率),很难兼顾多方面的高精度测量。因此,未来可考虑结合多种实验方法,如比较地下水井观测记录仪获取的数据与 ERT 方法获取的含水层整体盐分分布图的数据,以验证数据的可靠,从而更全面、准确地揭示地下水体系的海水垂向入侵变化情况。

2)数值模拟应更多地与现场观测实验数据结合,并在模型简化时充分考虑其可行性,同时考虑耦合多个模型以更好地重现整个海水垂向入侵的过程。

由于地下盐分数据常难以获取,概念化的数值模拟没有现场实验数据的支持,虽然能得到一定程度的定性结果,但可信度较低。同时,含水层异质性、淡水补给等因素的简化有可能使模型模拟得到的结果有很大的不确定性。未来应多开展现场观测试验,一方面,尽可能将模型模拟的结果和现场观测实验数据相匹配。另一方面,获取更多数据以减少模型简化,提高模型模拟结果的可靠度。最后,由于现有模型难以重现复杂的海水垂向入侵过程,运用

单一模型模拟可能会影响模拟结果的准确性,未来可考虑耦合多个模型,或开发新模型,使建模情景与海水垂向入侵实际情况更好地匹配,提高模拟结果可信度。

3)需要更加关注沿海地区虾塘咸水养殖所导致的海水垂向入侵问题,深入理解虾塘养殖方法及虾养殖场的空间分布如何影响沿海地区地下盐分的运移。

咸水养殖对地下水的咸化通常被忽略,因此,应加强对咸水养殖引发的海水垂向入侵机制的研究,并改进养殖方式。可以在虾塘附近修建观测井并安装记录仪,实时监测咸水虾塘附近含水层盐分变化,对沿海含水层中一系列水产养殖管理情景进行数值模拟,进而优化养殖方法与用水方式,减少海水垂向入侵影响。

#### 参考文献:

- [1] 骆永明. 中国海岸带可持续发展中的生态环境问题与海岸科学发展[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1133-1142.
- LUO Yongming. Ecological and environmental issues in the sustainable development of China's coastal zone and the development of coastal science[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(10): 1133-1142.
- [2] AHMED N, THOMPSON S. The blue dimensions of aquaculture: A global synthesis[J]. Science of The Total Environment, 2019, 652: 851-861.
- [3] ELSAYED S M, OUMERACI H. Modelling and mitigation of storm-induced saltwater intrusion: Improvement of the resilience of coastal aquifers against marine floods by subsurface drainage[J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 100: 252-277.
- [4] 熊贵耀, 付腾飞, 徐兴永, 等. 滨海含水层海水入侵影响因素研究综述[J]. 海洋科学, 2019, 43(6): 102-112.
- XIONG Guiyao, FU Tengfei, XU Xinyong, et al. A review of research on factors influencing seawater intrusion in coastal aquifers[J]. Marine Sciences, 2019, 43(6): 102-112.
- [5] CARLSON D A, VAN BIERSEL T P, MILNER L R. Storm-damaged saline-contaminated boreholes as a means of aquifer contamination[J]. Groundwater, 2008, 46(1): 69-79.
- [6] HUIZER S, Luijendijk A P, Bierkens M F P. Global potential for the growth of fresh groundwater resources with large beach nourishments[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 12451.
- [7] NEUMANN B, VAFEIDIS A T, ZIMMERMANN J, et al. Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding - A global assessment[J]. PLoS ONE, 2015, 10(3): e0118571.
- [8] HUIZER S, KARAOULIS M C, OUDE ESSINK G H P, et al. Monitoring and simulation of salinity changes in response to tide and storm surges in a sandy coastal aquifer system[J]. Water Resources Research, 2017, 53(8): 6487-6509.
- [9] CARDENAS M B, BENNETT P C, ZAMORA P B, et al. Devastation of aquifers from tsunami-like storm surge by Supertyphoon Haiyan: Devastation of aquifers by Haiyan[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(8): 2844-2851.
- [10] WANG Y, JIAO J J. Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in the confined Quaternary aquifer of the Pearl River Delta, China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 438/439: 112-124.
- [11] VERRALL D P, READ W W. Predicting diffusion in aquifers beneath saline ponds[J]. Journal of Hydrology, 2012, 475: 150-157.
- [12] ZAMRSKY D, SANCHEZ M F. Global quick scan of the vulnerability of groundwater systems to tsunamis[C]// Proceedings of the 23rd Salt Water Intrusion Meeting, Husum, German, 2014: 275-278.
- [13] CROUCHER A E, O'SULLIVAN M J. The Henry problem for saltwater intrusion[J]. Water Resources Research, 1995, 31(7): 1809-1814.
- [14] KLASSEN J, ALLEN D M. Assessing the risk of saltwater intrusion in coastal aquifers[J]. Journal of Hydrology, 2017, 551: 730-745.
- [15] 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(6): 29-33.
- XUE Yuqun, XIE Chunhong, WU Jichun. Study of seawater intrusion[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1992(6): 29-33.
- [16] 姜嘉礼. 葫芦岛市滨海地区海水入侵研究[J]. 水文, 2002, 22(2): 27-31.
- JIANG Jiali. Study on seawater intrusion in coastal areas of Huludao City[J]. Journal of China Hydrology, 2002, 22(2): 27-31.
- [17] 郭占荣, 黄奕普. 海水入侵问题研究综述[J]. 水文, 2003, 23(3): 9-15.
- GUO Zhanyong, HUANG Yipu. A review of seawater intrusion studies[J]. Journal of China Hydrology, 2003(3): 9-15.
- [18] 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 types of coastal zones[J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(3): 442-449.
- [19] FERGUSON G, GLEESON T. Vulnerability of coastal

- aquifers to groundwater use and climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(5): 342-345.
- [20] WERNER A D, BAKKER M, POST V E, et al. Sea-water intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 3-26.
- [21] PEDUZZI P, CHATENOUX B, DAO H, et al. Global trends in tropical cyclone risk[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(4): 289-294.
- [22] GIAMBASTIANI B M S, COLOMBANI N, GREGGIO N, et al. Coastal aquifer response to extreme storm events in Emilia-Romagna, Italy[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(8): 1613-1621.
- [23] HOLDING S, ALLEN D M, FOSTER S, et al. Groundwater vulnerability on small islands[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(12): 1100-1103.
- [24] KETABCHI H, MAHMOODZADEH D, ATAIE-ASHTIANI B, et al. Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 235-255.
- [25] POST V E A, HOUBEN G J. Density-driven vertical transport of saltwater through the freshwater lens on the island of Baltrum (Germany) following the 1962 storm flood[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 689-702.
- [26] MAHMOODZADEH D, Karamouz M. Seawater intrusion in heterogeneous coastal aquifers under flooding events[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 1118-1130.
- [27] ANDERSON W P. Aquifer salinization from storm outwash[J]. *Journal of Coastal Research*, 2002, 18(3): 413-420.
- [28] CHAMBERS L G, OSBORNE T Z, REDDY K R. Effect of salinity-altering pulsing events on soil organic carbon loss along an intertidal wetland gradient: a laboratory experiment[J]. *Biogeochemistry*, 2013, 115(1/3): 363-383.
- [29] 夏军, 李森, 李福林, 等. 海平面上升对山东省滨海地区海水入侵的影响[J]. *人民黄河*, 2013, 35(9): 1-3, 7.  
XIA Jun, LI Miao, LI Fulin, et al. Impact of sea level rise on seawater intrusion in coastal areas of Shandong Province[J]. *Yellow River*, 2013, 35(9): 1-3, 7.
- [30] 刘克修, 袁文亚, 骆敬新, 等. 海平面上升——悄然发生的海洋灾害[J]. *海洋信息*, 2012(3): 31-39.  
LIU Kexiu, YUAN Wenya, LUO Jingxin, et al. Sea level rise - a silent marine disaster[J]. *Journal of Marine Information Technology and Application*, 2012(3): 31-39.
- [31] 杨桂山. 中国沿海风暴潮灾害的历史变化及未来趋向[J]. *自然灾害学报*, 2000, 9(3): 23-30.  
YANG Guishan. Historical changes and future trends of coastal storm surge hazards in China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2000, 9(3): 23-30.
- [32] BILSKIE M V, HAGEN S C, MEDEIROS S C, et al. Dynamics of sea level rise and coastal flooding on a changing landscape[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(3): 927-934.
- [33] ALMAR R, RANASINGHE R, BERGSMA E W J, et al. A global analysis of extreme coastal water levels with implications for potential coastal overtopping[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 3775.
- [34] EMANUEL K A. Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(30): 12219-12224.
- [35] FAGHERAZZI S, NORDIO G, MUNZ K, et al. Variations in persistence and regenerative zones in coastal forests triggered by sea level rise and storms[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(17): 2019.
- [36] KEARNEY W S, FERNANDES A, FAGHERAZZI S. Sea-level rise and storm surges structure coastal forests into persistence and regeneration niches[J]. *PLoS One*, 2019, 14(5): e0215977.
- [37] GUIMOND J A, MICHAEL H A. Effects of marsh migration on flooding, saltwater intrusion, and crop yield in coastal agricultural land subject to storm surge inundation[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(2): e2020WR028326.
- [38] BOSTOCK J, MCANDREW B, RICHARDS R, et al. Aquaculture: global status and trends[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 365(1554): 2897-2912.
- [39] YANG P, LAI D Y F, JIN B, et al. Dynamics of dissolved nutrients in the aquaculture shrimp ponds of the Min River estuary, China: Concentrations, fluxes and environmental loads[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 603/604: 256-267.
- [40] AKBER M A, AZIZ A A, LOVELOCK C. Major drivers of coastal aquaculture expansion in Southeast Asia[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2020, 198: 105364.
- [41] TAL A, WEINSTEIN Y, YECHIELI Y, et al. The influence of fish ponds and salinization on groundwater quality in the multi-layer coastal aquifer system in Israel[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 768-783.
- [42] DUAN Y Q, LI X, ZHANG L P, et al. Mapping national-scale aquaculture ponds based on the Google Earth Engine in the Chinese coastal zone[J]. *Aquaculture*, 2020, 520: 734666.
- [43] HOU Y X, YANG J, RUSSONIELLO C J, et al. Impacts of coastal shrimp ponds on saltwater intrusion and submarine groundwater discharge[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(7): e2021WR031866.
- [44] MICHAEL H A, POST V E, WILSON A M, et al. Science, society, and the coastal groundwater squeeze[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(4): 2610-2617.

- [45] CANTELON J A, GUIMOND J A, ROBINSON C E, et al. Vertical saltwater intrusion in coastal aquifers driven by episodic flooding: A review[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58: e2022WR032614.
- [46] GIAMBASTIANI B M S, ANTONELLINI M, OUDE ESSINK G H P, et al. Saltwater intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): A numerical model[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 340(1/2): 91-104.
- [47] XIAO K, LI H, XIA Y, et al. Effects of tidally varying salinity on groundwater flow and solute transport: insights from modelling an idealized Creek marsh aquifer[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(11): 9656-9672.
- [48] ATAIE-ASHTIANI B, VOLKER R E, LOCKINGTON D A. Tidal effects on sea water intrusion in unconfined aquifers[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 216(1): 17-31.
- [49] POOL M, POST V E, SIMMONS C T. Effects of tidal fluctuations and spatial heterogeneity on mixing and spreading in spatially heterogeneous coastal aquifers[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(3): 1570-1585.
- [50] CHEN B F, HSU S M. Numerical study of tidal effects on seawater intrusion in confined and unconfined aquifers by time-independent finite-difference method[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2004, 130(4): 191-206.
- [51] 武雅洁, 杨自良, 程从敏, 等. 潮汐波动对潜水含水层海水入侵规律的影响研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(10): 91-98.  
WU Yajie, YANG Ziliang, CHENG Congmin, et al. Study on the influence of tidal fluctuations on the intrusion pattern of seawater in submerged aquifers[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2020, 50(10): 91-98.
- [52] POOL M, CARRERA J. A correction factor to account for mixing in Ghyben-Herzberg and critical pumping rate approximations of seawater intrusion in coastal aquifers: Correction factor to control seawater[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(5): W05506.
- [53] SIENA M, RIVA M. Groundwater withdrawal in randomly heterogeneous coastal aquifers[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(5): 2971-2985.
- [54] YU X, MICHAEL H A. Mechanisms, configuration typology, and vulnerability of pumping-induced seawater intrusion in heterogeneous aquifers[J]. *Advances in Water Resources*, 2019, 128: 117-128.
- [55] 丰爱平, 谷东起, 夏东兴. 莱州湾南岸海水入侵发展动态和原因[J]. *海岸工程*, 2006, 25(3): 7-13.  
FENG Aiping, GU Dongqi, XIA Dongxing. Dynamics and causes of seawater intrusion on the south coast of Laizhou Bay[J]. *Coastal Engineering*, 2006, 25(3): 7-13.
- [56] YANG J, GRAF T, PTAK T. Combined influence of weir construction and sea-level rise on freshwater resources of a coastal aquifer in northern Germany[J]. *Hydrogeology Journal*, 2019, 27(7): 2695-2705.
- [57] YAN M, LU C H, WERNER A D, et al. Analytical, experimental, and numerical investigation of partially penetrating barriers for expanding island freshwater Lenses[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(3): e2020WR028386.
- [58] WU H Q, LU C H, YAN M, et al. Expanding freshwater lenses adjacent to gaining rivers through vertical low-hydraulic-conductivity barriers: Analytical and experimental validation[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(2): e2019WR025750.
- [59] 吕盼盼, 宋健, 吴剑锋, 等. 水力屏障和截渗墙在海水入侵防治中的数值模拟研究[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 32-40.  
LV Panpan, SONG Jian, WU Jianfeng et al. Numerical simulation study of hydraulic barriers and interception walls in seawater intrusion control[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 32-40.
- [60] 武雅洁, 冯峰, 雷鑫. 地下截渗墙影响下的咸水入侵规律研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(8): 131-138.  
WU Yajie, FENG Feng, LEI Xin. Study on the saltwater intrusion pattern under the influence of underground interception wall[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(8): 131-138.
- [61] 刘莹, 姜锡仁, 王兴, 等. 莱州湾南岸海水入侵变化趋势及成因分析[J]. *海洋科学*, 2018, 42(2): 108-117.  
LIU Ying, JIANG Xiren, WANG Xing, et al. Analysis of the trends and causes of seawater intrusion in the south coast of Laizhou Bay[J]. *Marine Sciences*, 2018, 42(2): 108-117.
- [62] 季智灵, 周晨琦, 赵忠伟, 等. 水库对海岸带海水入侵影响的数值模拟研究[J]. *海洋科学*, 2021, 45(4): 75-82.  
JI Zhiling, ZHOU Chenqi, ZHAO Zhongwei, et al. Numerical simulation of the effect of reservoirs on seawater intrusion in coastal zone[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(4): 75-82.
- [63] VERRALL D P, READ W W, NARAYAN K A. Predicting salt advection in groundwater from saline aquaculture ponds[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 364(3): 201-206.
- [64] TERRY J P, FALKLAND A C. Responses of atoll freshwater lenses to storm-surge overwash in the Northern Cook Islands[J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(3): 749-759.
- [65] BAILEY R T. Quantifying transient post-overwash aquifer recovery for atoll islands in the Western Pacific[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(20): 4470-4482.
- [66] 黄磊, 郭占荣. 中国沿海地区海水入侵机理及防治措施研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2008, 19(2):

- 118-123.
- HUANG Lei, GUO Zhanyong. Study on the mechanism of seawater intrusion and prevention measures in coastal areas of China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(2): 118-123.
- [67] CHAUMILLON E, BERTIN X, FORTUNATO A B, et al. Storm-induced marine flooding: Lessons from a multidisciplinary approach[J]. Earth-Science Reviews, 2017, 165: 151-184.
- [68] HOLDING S, ALLEN D M. Wave overwash impact on small islands: Generalised observations of freshwater lens response and recovery for multiple hydrogeological settings[J]. Journal of Hydrology, 2015, 529(Pt.3): 1324-1335.
- [69] ILLANGASEKARE T, TYLER S W, CLEMENT T P, et al. Impacts of the 2004 tsunami on groundwater resources in Sri Lanka[J]. Water Resources Research, 2006, 42(5): W05201.
- [70] HOLDING S, ALLEN D M. From days to decades: numerical modelling of freshwater lens response to climate change stressors on small low-lying islands[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(2): 933-949.
- [71] ALSUMAIEI A A, BAILEY R T. Quantifying threats to groundwater resources in the Republic of Maldives Part II: Recovery from tsunami marine overwash events[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(9): 1154-1165.
- [72] POST V E A, KOOI H. Rates of salinization by free convection in high-permeability sediments: insights from numerical modeling and application to the Dutch coastal area[J]. Hydrogeology Journal, 2003, 11(5): 549-559.
- [73] LU H. Effect of evaporation on land salinization after storm surge overtopping embankment[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 676(1): 012032.
- [74] ZHENG W J, YANG Z L, WANG X X, et al. Impacts of evaporation and inundation on near-surface salinity at a coastal wetland park[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 185: 114373.
- [75] VAN BIERSEL T P, CARLSON D A, MILNER L R. Impact of hurricanes storm surges on the groundwater resources[J]. Environmental Geology, 2007, 53: 813-826.
- [76] PALACIOS A, LEDO J J, LINDE N, et al. Time-lapse cross-hole electrical resistivity tomography (CHERT) for monitoring seawater intrusion dynamics in a Mediterranean aquifer[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(4): 2121-2139.
- [77] KIFLAI M E, WHITMAN D, OGURCAK D E, et al. The effect of hurricane irma storm surge on the freshwater lens in Big Pine Key, Florida using electrical resistivity tomography[J]. Estuaries and Coasts, 2020, 43(5): 1032-1044.
- [78] HERMANS T, VANDENBOHEDE A, LEBBE L, et al. Imaging artificial salt water infiltration using electrical resistivity tomography constrained by geostatistical data[J]. Journal of Hydrology, 2012, 438-439: 168-180.
- [79] 黎清华. 高位海水养殖影响下的地下水咸化过程识别及其模拟——以北海大冠沙地区为例[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2018.
- LI Qinghua. Identification of groundwater salinization process under the influence of high level mariculture and its simulation[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2018.
- [80] GARCIA-ORELLANA J, RODELLAS V, TAMBORSKI J, et al. Radium isotopes as submarine groundwater discharge (SGD) tracers: Review and recommendations[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 220: 103681.
- [81] GILFEDDER B S, WASKA H, WISMETH F, et al. Using heat as a tracer to map and quantify water infiltration and exfiltration along a complex high energy beach face[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2021, 250: 107140.
- [82] LEROUX N K, KURYLYK B L, BRIGGS M A, et al. Using heat to trace vertical water fluxes in sediment experiencing concurrent tidal pumping and groundwater discharge[J]. Water Resources Research, 2021, 57(2): e2020WR027904.
- [83] CHUI T F M, TERRY J P. Influence of sea-level rise on freshwater lenses of different atoll island sizes and lens resilience to storm-induced salinization[J]. Journal of Hydrology, 2013, 502: 18-26.
- [84] LIU J Q, TOKUNAGA T. Future risks of tsunami-induced seawater intrusion into unconfined coastal aquifers: Insights from numerical simulations at Nijima Island, Japan[J]. Water Resources Research, 2019, 55(12): 10082-10104.
- [85] XIAO H, WANG D B, MEDEIROS S C, et al. Exploration of the effects of storm surge on the extent of salt-water intrusion into the surficial aquifer in coastal east-central Florida (USA)[J]. Science of The Total Environment, 2019, 648: 1002-1017.
- [86] CHUI T F M, TERRY J P. Groundwater salinisation on atoll islands after storm-surge flooding: modelling the influence of central topographic depressions: Influence of topographic depressions on atoll groundwater salinisation after storm surge[J]. Water and Environment Journal, 2015, 29(3): 430-438.
- [87] YU X, YANG J, GRAF T, et al. Impact of topography on groundwater salinization due to ocean surge inundation[J]. Water Resources Research, 2016, 52(8): 5794-5812.
- [88] VITHANAGE M, ENGESGAARD P, JENSEN K H, et

- al. Laboratory investigations of the effects of geologic heterogeneity on groundwater salinization and flush-out times from a tsunami-like event[J]. *Journal of contaminant hydrology*, 2012, 136: 10-24.
- [89] SONG J, YANG Y, WU J F, et al. The coastal aquifer recovery subject to storm surge: Effects of connected heterogeneity, physical barrier and surge frequency[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127835.
- [90] YANG J, ZHANG H C, YU X, et al. Impact of hydrogeological factors on groundwater salinization due to ocean-surge inundation[J]. *Advances in Water Resources*, 2018, 111: 423-434.
- [91] BAILEY R T, JENSON J W. Effects of marine overwash for atoll aquifers: Environmental and human factors[J]. *Groundwater*, 2014, 52(5): 694-704.
- [92] VIOLETTE S, BOULICOT G, GORELICK S M. Tsunami-induced groundwater salinization in southeastern India[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2009, 341(4): 339-346.
- [93] VITHANAGE M, VILLHOLTH K G, MAHATANTILA K, et al. Effect of well cleaning and pumping on groundwater quality of a tsunami-affected coastal aquifer in eastern Sri Lanka[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): 56-64.
- [94] VITHANAGE M, ENGESGAARD P, VILLHOLTH K G, et al. The effects of the 2004 tsunami on a coastal aquifer in Sri Lanka[J]. *Groundwater*, 2012, 50(5): 704-714.
- [95] PERRI S, MOLINI A, HEDIN L O, et al. Contrasting effects of aridity and seasonality on global salinization[J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15(5): 375-381.
- [96] KAIHOTSU I, ONODERA S I, SHIMADA J, et al. Recovery of groundwater in the Sanriku region contaminated by the tsunami inundation from the 2011 Tohoku earthquake[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(6): 250.
- [97] GINGERICH S B, VOSS C I, JOHNSON A G. Sea-water-flooding events and impact on freshwater lenses of low-lying islands: Controlling factors, basic management and mitigation[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 676-688.
- [98] PIT I R, GRIFFIOEN J, WASSEN M J. Environmental geochemistry of a mega beach nourishment in the Netherlands: Monitoring freshening and oxidation processes[J]. *Applied Geochemistry*, 2017, 80: 72-89.
- [99] 张国明, 顾卫, 吴之正, 等. 渤海湾风暴潮倒灌对沿岸农田土壤盐分的影响[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(2): 157-160.  
ZHANG Guoming, GU Wei, WU Zhizheng, et al. Effects of storm surge back-up in Bohai Bay on soil salinity of coastal farmland[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(2): 157-160.
- [100] CHUI T F M, TERRY J P. Modeling fresh water lens damage and recovery on atolls after storm-wave wash-over[J]. *Ground Water*, 2012, 50(3): 412-420.
- [101] ILLANGASEKARE T, TYLER S W, CLEMENT T P, et al. Impacts of the 2004 tsunami on groundwater resources in Sri Lanka[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(5): W05201.
- [102] CHANG Z Q, NEORI A, HE Y Y, et al. Development and current state of seawater shrimp farming, with an emphasis on integrated multi-trophic pond aquaculture farms, in China – a review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2020, 12(4): 2544-2558.
- [103] BURFORD M A, COSTANZO S D, DENNISON W C, et al. A synthesis of dominant ecological processes in intensive shrimp ponds and adjacent coastal environments in NE Australia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 46(11): 1456-1469.
- [104] THO N, MERCKX R, UT V N. Impacts of saline water irrigation and shrimp pond discharges on the surrounding waters of a coastal district in the Mekong delta of Vietnam[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(5): 2015-2027.
- [105] 苏守明. 海水高位养殖造成的环境问题分析——以北部湾海水养殖为例[J]. *技术与市场*, 2012, 19(6): 432-433, 435.  
SU Shouming. Analysis of environmental problems caused by marine-based aquaculture - an example of marine-based aquaculture in Beibu Gulf[J]. *Technology and Market*, 2012, 19(6): 432-433, 435.
- [106] LI Q H, ZHANG Y P, CHEN W, et al. The integrated impacts of natural processes and human activities on groundwater salinization in the coastal aquifers of Beihai, southern China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(5): 1513-1526.
- [107] HOU Y X, ZHAO G, CHEN X H, et al. Improving satellite retrieval of coastal aquaculture pond by adding water quality parameters[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(14): 3306.
- [108] HAN D M, CURRELL M J. Delineating multiple salinization processes in a coastal plain aquifer, northern China: hydrochemical and isotopic evidence[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(6): 3473-3491.
- [109] BEKELE E, ZHANG Y H, DONN M, et al. Inferring groundwater dynamics in a coastal aquifer near wastewater infiltration ponds and shallow wetlands (Kwinana, Western Australia) using combined hydrochemical, isotopic and statistical approaches[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 1055-1070.
- [110] 张耀文. 海水入侵作用下滨海盐渍土演化过程研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2022.  
ZHANG Yaowen. Study on the evolutionary process of

- coastal saline soils under the effect of seawater intrusion[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2022.
- [111] 陈丽娟, 冯起, 王昱, 等. 微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 44-51.
- CHEN Lijuan, FENG Qi, WANG Yu, et al. Water and salt transport in clay-bearing interlayer soils under brackish water irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(8): 44-51.
- [112] 张美桃, 杨培岭, 任树梅, 等. 灌溉水盐分及灌水量对土壤水盐分布与春玉米生长的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 290-298.
- ZHANG Meitao, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Effects of irrigation water salinity and irrigation volume on soil water-salt distribution and spring corn growth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 290-298.
- [113] 庞桂斌, 徐征和, 刘培成, 等. 黄河三角洲地区冬小麦微咸水灌溉制度模拟[J]. 人民黄河, 2016, 38(8): 140-144.
- PANG Guibin, XU Zhenghe, LIU Pecheng, et al. Simulation of brackish water irrigation system for winter wheat in the Yellow River Delta[J]. Yellow River, 2016, 38(8): 140-144.

## Advancements in seawater vertical intrusion research

HE Lanxuan<sup>1</sup>, YANG Yun<sup>2</sup>, SONG Jian<sup>2</sup>, YU Xuan<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210018, China)

**Received:** Apr. 11, 2023

**Key words:** coastal aquifers; vertical seawater (saltwater) intrusion; storm surges; shrimp pond culture; water resources; groundwater salinization

**Abstract:** With increasing global warming, the frequency and intensity of marine hazards, such as sea level rise and storm surge, may increase in coastal areas, and the resulting vertical seawater intrusion may cause the salinization of freshwater in aquifers over a large area. Concurrently, brackish water aquaculture in coastal shrimp ponds is increasing because of human activities, and the resulting vertical seawater intrusion may deteriorate groundwater quality and the ecological environment in coastal areas. Although some scholars have achieved substantial results in the study of seawater intrusion, the freshwater salinization and groundwater restoration must be elaborately studied owing to the complexity of seawater intrusion. This study describes the hazards of seawater intrusion and previous research approaches, summarizes their results, identifies the factors influencing seawater intrusion, and highlights the threats of flooding and aquaculture activities to aquifers in coastal areas. The following results were obtained in this study. (1) The common methods used to study seawater pendulous intrusion include indoor experiments and numerical simulations. (2) Vertical seawater intrusion is mainly related to topography, aquifer properties, and hydrometeorological conditions. (3) Human activities such as shrimp pond farming may become a potential source of vertical seawater intrusion. Future studies on seawater intrusion should combine various field observation experimental methods. Numerical simulations should focus on mutual validation with experimental data obtained from field observations, and model simplification methods must be carefully examined. Moreover, possible vertical seawater intrusion caused by human activities such as shrimp pond farming should be extensively studied.

(本文编辑: 赵卫红)