DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.06.004

潮汐作用下分层非均质含水层海水入侵的渗流试验和数值模拟

方运海[1],汤海松[2],郑天元[2],郑西来[2],钱家忠[1]

(1.合肥工业大学资源与环境工程学院,安徽 合肥 230009;
2.中国海洋大学环境科学与工程学院,山东 青岛 266100)

摘要:为了更好地保护沿海地下淡水资源,探究复杂水文地质条件下滨海含水层海水入侵的水动力机制,结合室内渗流试验和数值模拟方法,研究了含水层非均质性和潮汐作用共同影响下的海水入侵问题。结果表明:静态和潮汐海洋边界下滨海非均质含水层咸淡水空间分布显著不同,潮汐作用会减小下咸水楔侵入距离约30.8%,导致下咸水楔咸淡水混合带宽度增大3倍;潮汐作用会在含水层上部潮间带区域形成上咸水楔,地下淡水排泄是潮间带咸水聚集的关键阻力,地下淡水排泄量越大,潮间带上咸水楔面积越小;在相同水力梯度作用下,静态和潮汐海洋边界下的均质、非均质含水层海水入侵距离均随着渗透系数增大而增大。

关键词:滨海含水层;海水入侵;地下水排泄;非均质;潮汐作用

中图分类号:TV138;P731.23 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2024)06-0023-07

Infiltration experiments and numerical simulations of seawater intrusion in stratified heterogeneous aquifers affected by tides

FANG Yunhai[1], **TANG Haisong**[2], **ZHENG Tianyuan**[2], **ZHENG Xilai**[2], **QIAN Jiazhong**[1]

(1. *School of Resources and Environmental Engineering*, *Hefei University of Technology*, *Hefei* 230009, *China*;
2. *College of Environmental Science and Engineering*, *Ocean University of China*, *Qingdao* 266100, *China*)

Abstract: To better protect fresh groundwater resources, it is urgent to explore the hydrodynamic mechanism of seawater intrusion in coastal aquifers under complex hydrogeological conditions. In this study, a rigorous combination of laboratory experiments and numerical simulations was used to explore the mechanism of seawater intrusion under the combined influence of aquifer heterogeneity and tides. The results showed that spatial distribution of saltwater-freshwater in coastal heterogeneous aquifers was significantly different under the static and tidal sea boundaries. Tidal action reduced the intrusion distance of the saltwater wedge by 30.8%, resulting in a threefold increase in the width of the mixing zone around the saltwater wedge. Tidal action generated an upper saline plume (USP) in the intertidal zone, and fresh groundwater discharge was the key resistance to the accumulation of saltwater in the USP. When the flux of fresh groundwater discharge increased, the USP area would decrease. Under the same hydraulic gradient, the distance of seawater intrusion increased with the increasing permeability, regardless of static/tidal and homogeneous/heterogeneous conditions.

Key words: coastal aquifer; seawater intrusion; groundwater discharge; heterogeneity; tide

滨海含水层是连接陆地-海洋系统的地下过渡带,海水和地下水密度的差异导致海水沿含水层向内陆入侵,形成海水入侵现象[1-4]。海水入侵会导致沿海地区地下淡水咸化,降低淡水水质,引起淡水资源短缺、土壤盐渍化以及湿地退化等一系列生态环境问题[5-7]。而滨海地区人口稠密、人类活动剧烈、经济发达,水资源需求日益增长,这导致地下水被大量开采,地下水位降低,引起含水层中地下水与海水相互作用的失衡,海水

基金项目:国家自然科学基金项目(42302268);中国博士后科学基金项目(2022M720979);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2023HGQB0166)

作者简介:方运海(1992—),男,讲师,博士,主要从事地下水与地表水相互作用研究。E-mail:fangyunhai@hfut.edu.cn

通信作者:钱家忠(1968—),男,教授,博士,主要从事地下水渗流机理研究。E-mail:qianjiazhong@hfut.edu.cn

引用本文:方运海,汤海松,郑天元,等.潮汐作用下分层非均质含水层海水入侵的渗流试验和数值模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):23-29.

FANG Yunhai, TANG Haisong, ZHENG Tianyuan, et al. Infiltration experiments and numerical simulations of seawater intrusion in stratified heterogeneous aquifers affected by tides[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(6):23-29.

入侵问题日益严重[8-13]。深入研究含水层海水入侵的水动力机制对于滨海地下淡水资源保护和合理开发利用具有重要的科学意义。

滨海含水层海水入侵的距离与地下水排泄息息相关,二者均受含水层水文地质条件和海洋营力的影响,包括潮汐、波浪、内陆水力梯度、降雨、海滩坡度、渗透系数、非均质性、各向异性、水动力弥散等[14-16]。例如:Kuan 等[17]指出海水入侵的距离和范围与地下淡水排泄量成反比;Fang 等[18]采用变密度数值模型探究了潮汐波动下滨海含水层海水入侵的水动力机制,发现地下水排泄量是决定海水入侵范围的关键因子,地下水排泄量越大,海水进入含水层的总盐量越小。

许多学者探究了含水层复杂水文地质条件和海洋营力对海水入侵的影响:Etsias 等[19]采用室内试验和数值模拟方法,研究了6种不同非均质含水层条件下海水入侵的距离和侵入角,结果表明海水入侵距离与渗透系数的比值、含水层总渗透系数以及非均质层数均呈正相关关系,且低渗透系数层数越多,侵入角越陡峭;Fang 等[20]基于室内渗流试验发现,与静海平面情形相比,相同平均海平面高度下,潮汐作用引起的海水位波动导致滨海含水层海水入侵范围和距离均减小。虽然这些研究揭示了含水层非均质性和海洋营力对海水入侵的影响,但主要研究单一影响要素,二者共同作用下的海水入侵问题有待深入研究。

本文以单因素研究中常见的非均质和潮汐作用为例,探究含水层复杂水文地质条件和海洋营力共同影响下的海水入侵问题,阐明含水层非均质性和潮汐作用对海水入侵的共同影响,提高对滨海含水层海水入侵水动力机制的认识,以期为后续海水入侵防治技术开发提供理论依据。

1 研究方法

1.1 室内渗流试验

1.1.1 试验装置

地下水与海水相互作用的渗流试验在有机玻璃渗流槽中进行,渗流槽内部尺寸为172.9 cm(长)×8 cm(宽)×45 cm(高),由厚度为15 mm的有机玻璃板构成(图1)。渗流槽在水平方向分成淡水室、中央室和海水室3个部分,由透水的多孔有机玻璃板隔开。右侧淡水室通过溢流堰控制水位模拟定水头的内陆边界条件,溢流口高度为24.65 cm。中央室填充白色石英砂,装填高度为31.6 cm,左侧(海水室方向)模拟具有一定坡度的海滩(坡度1∶2.5)。海水室与变水头装置相连,模拟海平面波动的潮汐海洋边界。基于连通器原理,变水头装置周期性的升降引起海水室水位相应升降,产生一个类似正弦的潮汐振动水位。海水室平均水位固定在23.8 cm。对于静态海洋边界设定,停止变水头装置升降,高度固定在平均海水位处(23.8 cm)即可。

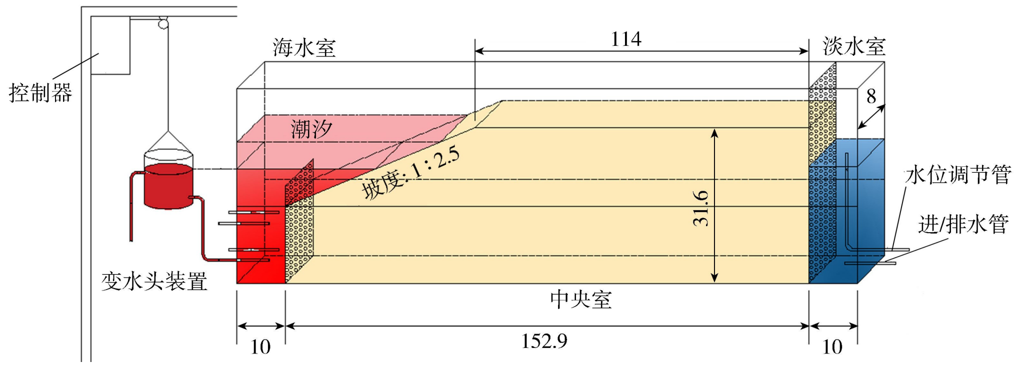


图1 室内渗流装置示意图(单位:cm)

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup (unit: cm)

白色石英砂用于模拟地下含水介质,粒径范围为40~70目,用筛网过筛后得到分布均匀的两种粒径石英砂(细砂和粗砂)。砂样使用前,用自来水漂洗若干次,烘干备用。砂样采用饱水方式分层装填,淡水水位高于填装的砂样10 cm,装填过程中,用直径5 cm的木棒搅拌混匀,并用硬质铁丝局部压实,去除气泡。砂样装填完毕并饱水静置6 h后进行渗透系数原位测定。依据达西定律计算得到粗砂的渗透系数为28.0 m/d,细砂的渗透系数为4.0 m/d。水动力弥散系数采用室内一维柱试验测定,纵向弥散度为0.0025 m,横向弥散度为0.00025 m,分子扩散系数为$1\times10^{-9}\,m^2/s$。残余饱和度为0.025,Van Genuchten 常数 n 和 a 分别为2.68和$14.5\,m^{-1}$。

地下淡水采用去离子水模拟,其溶质质量浓度为0 g/L,密度为1 000 g/L。海水由去离子水和分析纯氯化钠混合配制[21]。为了直观观测海水入侵过程,配制的海水中加入食品红染色剂进行染色,以和淡水区分[22]。在每升去离子水中,加入 34 g 氯化钠和 1 g 的食品红染料,配制的海水质量浓度为 35 g/L,密度为 1 025 g/L。

1.1.2　试验流程

将预先配置的着色海水置于 70 L 储水桶内,潜水泵置于其中并与海水室底部接口连接,打开潜水泵,开启变水头装置,海水入侵过程开始。试验过程中,高清相机(佳能 IXUS 285 HS)每隔 2 min 拍摄一次。试验持续运行直至达到稳定状态。当中央室内咸淡水分布变化(以咸水楔趾部坐标计)小于 0.1 cm 时,可认为达到了稳定状态,试验终止。

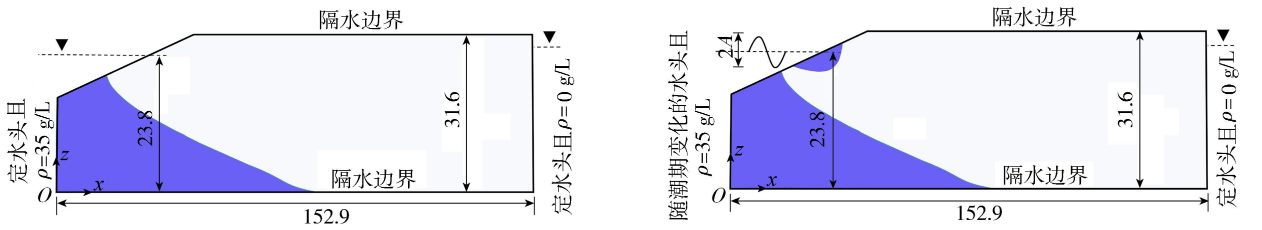
已有研究[20]对均质含水层条件下的数值模型进行了校正,因此本文试验主要在非均质情形下进行。以中央室左侧海滩与海水室交点高度(16 cm)为界限,将实验室尺度含水层分为上下 2 层。试验开始前,下层填装粗砂,上层填装细砂。试验分别在静态海洋边界和潮汐海洋边界下进行,潮汐振幅为 2 cm,频率为 1 min。

1.2　数值模拟

滨海含水层变密度、变饱和的地下水流和溶质运移过程由理查德方程耦合对流-弥散公式控制[23],数值模型采用成熟的商业软件 FEFLOW 进行搭建(图 2),其主体假设是均质各向同性的,不考虑含水层温度的影响,密度只与溶质质量浓度相关。数值模型尺寸与室内渗流试验(图 1)一致,顶部和底部边界设定为零通量边界;右侧淡水边界设定为定水头边界,溶质质量浓度为 0 g/L;左侧为海洋边界,不考虑潮汐活动时设定为定水头边界(图 2(a)),考虑海水位波动时,设定为潮汐边界(图 2(b)),当边界节点位于海水位之上且处于饱和状态时,设定为渗透面,允许淡水流出含水层,否则变成隔水边界[24]。当边界节点位于海水位之下时,设定为随潮汐变化的给定水头边界。当海水进入含水层时,溶质质量浓度为 35 g/L,流出时则为 0 g/L[25]。海水位随时间的波动:

$$h_t = Z_{\mathrm{MSL}} + A\sin(\omega t) \tag{1}$$

式中:h_t 为 t 时刻的海水位;Z_{MSL} 为平均海水位;A 为潮汐振幅;ω 为潮汐角频率。



(a) 静态海洋边界　　(b) 潮汐海洋边界

图 2　实验室尺度概念模型示意图(尺寸单位:cm)

Fig. 2　Schematic diagram of the laboratory-scale conceptual model (dimension unit: cm)

数值模型主体采用三角形剖分格式,并对潮间带区域进行加密,共离散成 90 119 个三角元,最大三角元边长为 0.4 cm。网格最大 Péclet 数小于 4,满足数值稳定的剖分要求[26]。数值模型所用的含水层参数与室内试验测定的一致。

基于渗流试验结果,对数值模型进行校正。采用校正后的模型,探究在静态海洋边界和潮汐海洋边界下,不同非均质含水层对海水入侵的影响,并与均质含水层进行对比。基于滨海含水层二元结构特点,以海滩与左侧海洋边界交点高度(16 cm)为基准,将含水层划分成上下 2 层,具体含水层非均质结构设定见表 1。

表 1　含水层结构和参数设定

Table 1　Aquifer structures and parameters

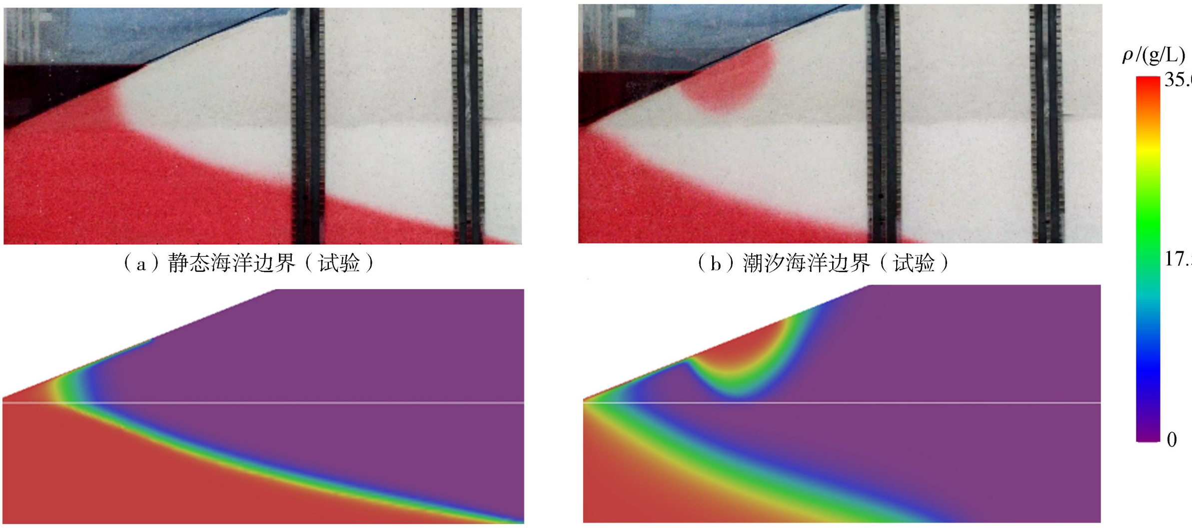
含水层编号	含水层属性	含水层渗透系数/(m/d)	
		上层	下层
S1	均 质	4.0	4.0
S2	均 质	28.0	28.0
S3	非均质	4.0	28.0
S4	非均质	28.0	4.0

2　结果与分析

2.1　渗流试验示踪的咸淡水分布

由图 3 可知,静态海洋边界下海水入侵会在含水层下部形成一个咸水区,称为下咸水楔。下咸水楔趾部与含水层底板的交点位置一般用来衡量海水入侵的距离。静态海洋边界下试验的海水入侵距离约为 65 cm,潮汐海洋边界下咸水楔入侵距离明显减小(约为 45 cm),减小 30.8%,表明潮汐作用对非均质含水层海水入

侵具有抑制作用,Fang 等[20,27-28]在均质含水层中得到了相似结论。此外,潮汐水位波动还会在含水层上部潮间带区域形成一个咸水区,称为上咸水楔,其形态近似 U 形。地下淡水通过上、下咸水楔之间区域排入大海。因此,静态和潮汐海洋边界下滨海非均质含水层咸淡水空间分布显著不同,忽略潮汐作用将会高估海水入侵程度。



(a)静态海洋边界(试验)　(b)潮汐海洋边界(试验)

(c)静态海洋边界(数值模拟)　(b)潮汐海洋边界(数值模拟)

图3　非均质条件下渗流试验和数值模型的咸淡水分布

Fig. 3　Comparison of experimental and simulation results of salinity distribution in stratified heterogeneous aquifer

静态和潮汐海洋边界条件下,数值模拟的非均质含水层咸淡水分布与渗流试验基本一致,表明本文构建的非均质数值模型是可靠的。因此,本文建立的实验室尺度数值模型可以用来模拟均质与非均质、静态与潮汐等复杂水文地质条件和海洋营力共同影响下的海水入侵问题。

2.2　静态海洋边界下含水层非均质性的影响

由图4可知,渗透系数高的含水层海水入侵距离明显大于渗透系数低的含水层,这与 Shi 等[29-30]的研究结论一致。依据 Glover[31]提出的潜水含水层海水入侵解析解,下咸水楔侵入界面与地下淡水排泄量和渗透系数之比(Q/k)成反比。低渗透均质含水层 S1 的 Q/k 为 1.062×10^{-2} m^2/m,高渗透均质含水层(S2)的 Q/k 为 1.032×10^{-2} m^2/m,导致高渗透含水层海水入侵距离更远。本文内陆淡水边界为定水头边界,因此低渗透和高渗透含水层的水力梯度不变。依据达西定律,引起二者 Q/k 不同的原因只能是地下淡水过水断面面积。对比 S1、S2 可知,高渗透含水层中海水入侵范围更大,下咸水楔之上的地下淡水过水断面小于低渗透含水层的,导致高渗透含水层中 Q/k 减小。因此,对于水力梯度不变的均质含水层,Q/k、海水入侵范围以及地下淡水过水断面三者互为因果关系。Q/k 减小,海水入侵范围增大,引起地下淡水过水断面减少,反过来导致 Q/k 减小,最终导致含水层海水入侵距离随着渗透系数增大而增大。

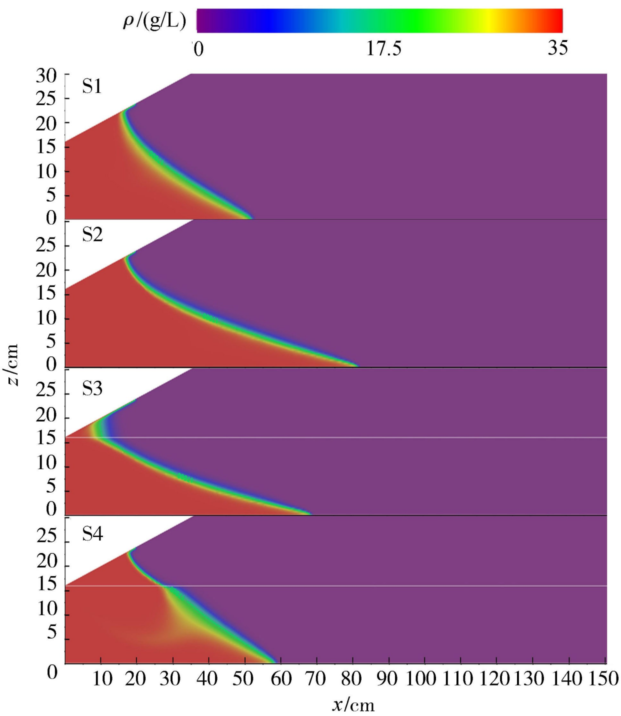


图4　静态海洋边界下含水层的咸淡水分布

Fig. 4　Comparison of salinity distributions in homogeneous and heterogeneous aquifers under static sea boundary

由 S3、S4 可知,非均质情形下的海水入侵距离介于低渗透均质和高渗透均质之间,且 S3 的海水入侵距离大于 S4。Etsias 等[19]提出平均渗透系数来衡量层

状非均质含水层整体的渗透系数。S3、S4 的平均渗透系数分别为 16.2、15.8 m/d。4 种含水层渗透系数从大到小排序为：S2、S3、S4、S1，这与图 4 中 4 种含水层海水入侵距离大小顺序一致，说明在水力梯度不变的均质和非均质含水层，海水入侵距离随着渗透系数增大而增大。

2.3　潮汐海洋边界下含水层非均质性的影响

由图 5 可知，潮汐海洋边界的 4 种含水层咸水楔入侵距离从大到小排序与静态海洋边界下的结果一致：S2、S3、S4、S1，表明在水力梯度不变的潮滩含水层，海水入侵距离同样随着渗透系数增大而增大。此外，潮汐作用会在下咸水楔边缘形成更宽的混合带（增大 3 倍），反映了潮汐作用对咸淡水混合的增强作用。除了下咸水楔之外，潮汐作用会在含水层上部潮间带区域形成上咸水楔，50% 等盐度线包围的上咸水楔面积在 S1 ~ S4 含水层结构下分别为 101.25、46.77、60.6、61.22 cm^2。在潮间带区域，涨潮时海水进入含水层，在中潮线到高潮线处入渗量最大；退潮时海水流出含水层，出流量在低潮线附近最大[32]。潮间带不同位置的差异性流动引起部分咸水聚集，形成上咸水楔。上咸水楔聚集的咸水量除了与潮间带渗透系数相关之外，地下淡水排泄携带潮间带咸水排向海洋，是其聚集的关键阻力。图 5 中地下淡水通过含水层上层排泄进入海洋，S1 ~ S4 含水层结构下地下淡水排泄量分别为 0.0352、0.2386、0.1402、0.1382 $m^3/(d \cdot m)$，其大小关系与上咸水楔面积大小顺序正好相反。地下淡水排泄量越大，潮间带咸水聚集的阻力越大，则上咸水楔面积越小。

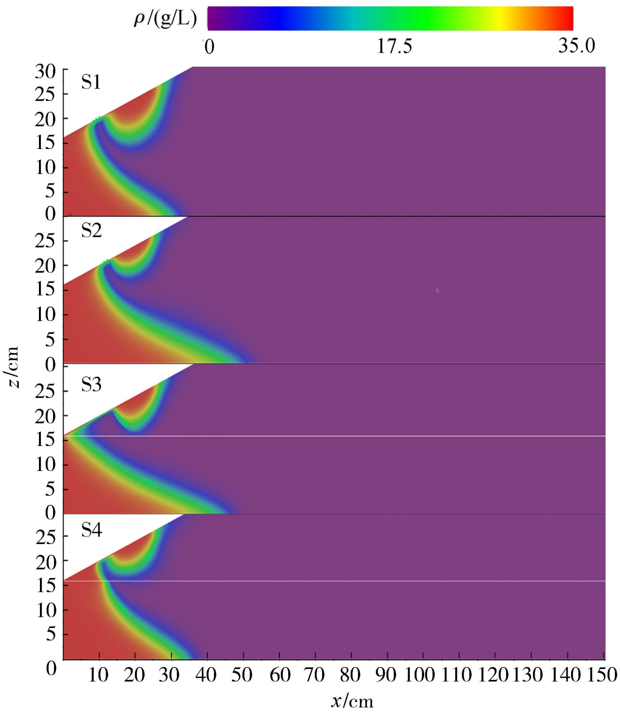


图 5　潮汐海洋边界下含水层的咸淡水分布

Fig. 5　Comparison of salinity distributions in homogeneous and heterogeneous aquifers under tidal sea boundary

3　结　　论

a. 静态和潮汐海洋边界下滨海非均质含水层咸淡水空间分布显著不同，潮汐作用会减小下咸水楔侵入距离约 30.8%，导致下咸水楔咸淡水混合带宽度增大 3 倍。潮汐作用对非均质含水层海水入侵具有抑制作用，忽略潮汐影响将会高估海水入侵程度。

b. 在水力梯度不变的滨海含水层，地下淡水排泄量与渗透系数之比减小，海水入侵范围增大，引起地下淡水过水断面减小，反过来导致地下淡水排泄量与渗透系数之比减小。因此，地下淡水排泄量与渗透系数之比、海水入侵范围以及地下淡水过水断面三者互为因果关系，导致静态海洋边界、潮汐海洋边界下的均质、非均质含水层海水入侵距离均随着渗透系数增大而增大。

c. 潮汐作用会在含水层上部潮间带区域形成上咸水楔，地下淡水排泄是潮间带咸水聚集的关键阻力，地下淡水排泄量越大，潮间带上咸水楔面积越小。

参考文献：

[1] 王宗志，王宇，王坤，等. 滨海地下水库建设与利用方式对含水层水盐运移规律的影响[J]. 水资源保护，2023，39(4)：69-78.（WANG Zongzhi，WANG Yu，WANG Kun，et al. Influences of coastal underground reservoir construction and utilization on saltwater and freshwater transport law in aquifers[J]. Water Resources Protection，2023，39(4)：69-78.(in Chinese)）

[2] 徐丽丽，束龙仓，李伟，等. 2000—2020 年中国地下水开采时空演变特征[J]. 水资源保护，2023，39(4)：79-85.（XU Lili，SHU Longcang，LI Wei，et al. Spatial and temporal evolution characteristics of groundwater mining in China from 2000 to 2020[J]. Water Resources Protection，2023，39(4)：79-85.(in Chinese)）

[3] ZHENG Tianyuan，YUAN Fengxiang，GAO Shaobo，et al. The impact of hydraulic conductivity anisotropy on the effectiveness of subsurface dam[J]. Journal of Hydrology，2023，626：130360.

[4] 李若华,马继侠,张舒羽,等. 强潮作用下钱塘江河口盐水入侵机制[J]. 水利水电科技进展,2022,42(5):37-44. (LI Ruohua, MA Jixia, ZHANG Shuyu, et al. Saltwater intrusion mechanism in the Qiantang River estuary under strong tide[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(5):37-44. (in Chinese))
[5] 徐兴永,付腾飞,熊贵耀,等. 海水入侵-土壤盐渍化灾害链研究初探[J]. 海洋科学进展,2020,38(1):1-10. (XU Xingyong, FU Tengfei, XIONG Guiyao, et al. Progress and prospect of the research on seawater intrusion to soil salinization disaster chain [J]. Advances in Marine Science,2020,38(1):1-10. (in Chinese))
[6] 王万冠,张汉珍,苏月月,等. 东营地区海水入侵与土壤盐渍化现状分析[J]. 地下水,2023,45(6):18-20. (WANG Wanguan, ZHANG Hanzhen, SU Yueyue, et al. Analysis of the current situation of seawater intrusion and soil salinization in Dongying area[J]. Ground Water,2023,45(6):18-20. (in Chinese))
[7] CHANG Qinpeng, ZHENG Tianyuan, GAO Chenchen, et al. Hydrodynamic behavior of freshwater-saltwater mixing zone in the context of subsurface physical barriers[J]. Journal of Environmental Management,2024,353:120080.
[8] LU Chunhui, WERNER A D. Timescales of seawater intrusion and retreat[J]. Advances in Water Resources,2013,59:39-51.
[9] 杨蕴,吴剑锋,林锦,等. 控制海水入侵的地下水多目标模拟优化管理模型[J]. 水科学进展,2015,26(4):579-588. (YANG Yun, WU Jianfeng, LIN Jin, et al. A multi-objective simulation-optimization model constrained by the potential seawater intrusion [J]. Advances in Water Science,2015,26(4):579-588. (in Chinese))
[10] 牛欣怡,鲁程鹏,卢佳赟,等. 机器学习模型在地下水埋深模拟中的适应性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):74-82. (NIU Xinyi, LU Chengpeng, LU Jiayun, et al. Adaptability analysis of machine learning model in groundwater depth simulation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):74-82. (in Chinese))
[11] 张婧,马贵宏,高雅,等. 华北山前平原典型井灌区地下水水位变化影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):21-28. (ZHANG Jing, MA Guihong, GAO Ya, et al. Analysis on influencing factors of groundwater level change in typical well irrigation area in piedmont plain of North China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(1):21-28. (in Chinese))
[12] 陈建生,韩莉文,马芬艳. 苏北平原隐伏玄武岩地下水研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):1-8. (CHEN Jiansheng, HAN Liwen, MA Fenyan. Study on the concealed basalt groundwater in Subei Plain[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(6):1-8. (in Chinese))
[13] CHEN Xinyu, ZHANG Ke, CHAO Lijun, et al. Quantifying natural recharge characteristics of shallow aquifers in groundwater overexploitation zone of North China[J]. Water Science and Engineering,2021,14(3):184-192.
[14] 张汉雄,胡晓农,陈麟. 莱州湾南岸海底地下水交换量研究[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(2):177-181. (ZHANG Hanxiong, HU Xiaonong, CHEN Lin. Study on submarine groundwater exchange capacity in south Laizhou Bay[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2018,16(2):177-181. (in Chinese))
[15] 张迪,王煜,郑小康,等. 大沽河流域海水入侵数值模拟及其全局敏感性分析[J]. 水资源保护,2024,40(1):100-107. (ZHANG Di, WANG Yu, ZHENG Xiaokang, et al. Numerical simulation of seawater intrusion in the Dagu River Basin and its global sensitivity analysis[J]. Water Resources Protection,2024,40(1):100-107. (in Chinese))
[16] YIN Jina, HUANG Yulu, LU Chunhui, et al. Uncertainty-based saltwater intrusion prediction using integrated Bayesian machine learning modeling (IBMLM) in a deep aquifer[J]. Journal of Environmental Management,2024,354:120252.
[17] KUAN W K, JIN Guangqiu, XIN Pei, et al. Tidal influence on seawater intrusion in unconfined coastal aquifers[J]. Water Resources Research,2012,48(2):W02502.
[18] FANG Yunhai, ZHENG Tianyuan, ZHENG Xilai, et al. Influence of tide-induced unstable flow on seawater intrusion and submarine groundwater discharge[J]. Water Resources Research,2021,57(4):e2020WR029038.
[19] ETSIAS G, HAMILL G A, ÁGUILA J F, et al. The impact of aquifer stratification on saltwater intrusion characteristics. Comprehensive laboratory and numerical study[J]. Hydrological Processes,2021,35(4):e14120.
[20] FANG Yunhai, ZHENG Tianyuan, WANG Huan, et al. Experimental and numerical evidence on the influence of tidal activity on the effectiveness of subsurface dams[J]. Journal of Hydrology,2021,603:127149.
[21] 王宗志,王宇,王坤,等. 滨海地下水库建设与利用方式对含水层水盐运移规律的影响[J]. 水资源保护,2023,39(4):69-78. (WANG Zongzhi, WANG Yu, WANG Kun, et al. Influences of coastal underground reservoir construction and utilization on saltwater and freshwater transport law in aquifers[J]. Water Resources Protection,2023,39(4):69-78. (in Chinese))
[22] 谢一凡,曾祎芃,杨杰,等. 基于离散裂隙基质模型的水平双裂隙含水层海水入侵机制[J]. 水科学进展,2023,34(3):454-464. (XIE Yifan, ZENG Yipeng, YANG Jie, et al. Seawater intrusion mechanism in coastal aquifer with horizontal double fractures based on discrete fracture matrix model[J]. Advances in Water Science,2023,34(3):454-464. (in Chinese))

[23] DIERSCH H J G. FEFLOW:finite element modeling of flow,mass and heat transport in porous and fractured media[M]. Berlin:Springer,2014.
[24] XIN Pei,WANG S S J,ROBINSON C,et al. Memory of past random wave conditions in submarine groundwater discharge[J]. Geophysical Research Letters,2014,41(7):2401-2410.
[25] WALTHER M,GRAF T,KOLDITZ O,et al. How significant is the slope of the sea-side boundary for modelling seawater intrusion in coastal aquifers? [J]. Journal of Hydrology,2017,551:648-659.
[26] ZHENG Tianyuan,ZHENG Xilai,CHANG Qinpeng,et al. Timescale and effectiveness of residual saltwater desalinization behind subsurface dams in an unconfined aquifer[J]. Water Resources Research,2021,57(2):e2020WR028493.
[27] 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,2020,50(10):91-98.(WU Yajie,YANG Ziliang,CHENG Congmin,et al. The influence of tidal oscillations on the behaviors of seawater intrusion in unconfined coastal aquifers[J]. Periodical of Ocean University of China,2020,50(10):91-98.(in Chinese))
[28] KUAN W K,XIN Pei,JIN Guangqiu,et al. Combined effect of tides and varying inland groundwater input on flow and salinity distribution in unconfined coastal aquifers[J]. Water Resources Research,2019,55(11):8864-8880.
[29] SHI Wenlong,LU Chunhui,YE Yu,et al. Assessment of the impact of sea-level rise on steady-state seawater intrusion in a layered coastal aquifer[J]. Journal of Hydrology,2018,563:851-862.
[30] ABDOULHALIK A,AHMED A A. The effectiveness of cutoff walls to control saltwater intrusion in multi-layered coastal aquifers:experimental and numerical study[J]. Journal of Environmental Management,2017,199:62-73.
[31] GLOVER E R. The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer[J]. Journal of Geophysical Research,1959,64(4):457-459.
[32] FANG Yunhai,ZHENG Tianyuan,WANG Huan,et al. Influence of dynamically stable-unstable flow on seawater intrusion and submarine groundwater discharge over tidal and seasonal cycles[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans,2022,127(4):e2021JC018209.

(收稿日期:2024-02-21　编辑:刘晓艳)

(上接第 14 页)

[23] 商守卫,王磊之,王银堂,等. 1960—2019 年成都地区极端降水时空演变特征分析[J]. 水资源保护,2023,39(3):195-204.(SHANG Shouwei,WANG Leizhi,WANG Yintang,et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics of extreme precipitation in Chengdu area from 1960 to 2019[J]. Water Resources Protection,2019,39(3):195-204.(in Chinese))
[24] HEVESI J A,ISTOK J D,FLINT A L. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics(Part I):structural analysis[J]. Journal of Applied Meteorology,1992,31(7): 661-676.
[25] 顾春雷,杨漾,朱志春. 几种建立 DEM 模型插值方法精度的交叉验证[J]. 测绘与空间地理信息,2011,34(5):99-102.(GU Chunlei,YANG Yang,ZHU Zhichun. Accuracy cross-validation of several interpolation methods of DEM[J]. Geomatics & Spatial Information Technology,2011,34(5):99-102.(in Chinese))
[26] KLING H,FUCHS M,PAULIN M. Runoff conditions in the upper Danube Basin under an ensemble of climate change scenarios[J]. Journal of Hydrology,2012,424-425:264-277.
[27] 冯平,张立斌,李建柱,等. 目标函数对滦河流域 SWAT 模型径流模拟不确定性的影响[J]. 水资源保护,2023,39(2):17-24.(FENG Ping,ZHANG Libin,LI Jianzhu,et al. Influence of objective function on uncertainty of SWAT model runoff simulation in the Luanhe River Basin[J]. Water Resources Protection,2019,39(2):17-24.(in Chinese))
[28] 蒋育昊,刘鹏举,夏智武,等. 站点密度对复杂地形 PRISM 月降雨空间插值精度的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(4):115-120.(JIANG Yuhao,LIU Pengju,XIA Zhiwu,et al. Effects of spatial station density on accuracy of spatial interpolation of monthly rainfall over complex terrain base on PRISM[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science Edition),2017,41(4):115-120.(in Chinese))
[29] 鞠琴,刘小妮,连子旭,等. 考虑高程的降水空间插值方法研究:以巴河流域为例[J]. 中国农村水利水电,2023(8):18-24.(JU Qin,LIU Xiaoni,LIAN Zixu,et al. Research on the spatial interpolation method of precipitation considering elevation: a case study of Bahe River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower,2023(8):18-24.(in Chinese))
[30] 张君霞,黄武斌,王一丞,等. 河西走廊西部一次暴雨过程降水特征及极端性分析[J]. 高原气象,2024,43(1):156-165.(ZHANG Junxia,HUANG Wubin,WANG Yicheng,et al. Analysis on precipitation extremes and characteristics of the rainstorm event in the West of Hexi Corredor[J]. Plateau Meteorology,2024,43(1):156-165.(in Chinese))

(收稿日期:2023-10-11　编辑:熊水斌)