

潮汐作用下河口含水层咸水入侵数值模拟

叶逾^{1,2}, 郭自来², 唐腾宇², 南统超^{1,3}, 徐腾^{1,2}, 谢一凡^{1,2}, 鲁春辉^{1,3,4}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为探析潮汐对河口相邻含水层咸水入侵的影响机制,在考虑了潮汐作用下的水位和盐分沿河道变化的基础上,构建了平行于河流的二维潮汐河口河流-含水层瞬态全耦合数值模型,分析了潮汐作用下河流与含水层中流场及盐分分布,并与无潮汐条件下的分布进行了对比。结果表明:潮汐促使海水通过河口迅速入侵河道上游,进而入渗相邻浅层含水层,形成盐指及局部环流,致使相邻浅层含水层大范围咸化,咸化程度和范围显著大于海岸带含水层海水入侵及无潮汐条件下对应工况;单周期内,含水层中的咸水入侵程度与范围随潮汐波动,在落潮中期达到最强,相较潮汐水位变化具有滞后性;入渗盐分部分在相邻浅层含水层中积累并向深层含水层扩散,部分随内陆地下水排泄至河流,继后经河道内陆地来水冲刷至海洋。

关键词:潮汐;河口含水层;咸水入侵;地下水排泄;数值模拟

中图分类号:P641

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2025)05-0278-07

Numerical simulation of saltwater intrusion in estuarine aquifers under tidal condition//YE Yu^{1,2}, GUO Zilai², TANG Tengyu², NAN Tongchao^{1,3}, XU Teng^{1,2}, XIE Yifan^{1,2}, LU Chunhui^{1,3,4} (1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 4. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: To explore the influence mechanism of tides on the intrusion of saline water into adjacent aquifers in estuaries, a two-dimensional transient fully coupled numerical model of river-aquifer parallel to the river was established based on the consideration of the variation of water level and salinity along the river under the action of tides. The flow field and salinity distribution in the river and aquifer under the action of tides were analyzed and compared with those under the condition without tides. The results show that tides promote the rapid intrusion of seawater into the upstream of the river through the estuary and then infiltrate into the adjacent shallow aquifer, forming salt fingers and local circulation, resulting in a large-scale salinization of the adjacent shallow aquifer. Compared with the seawater intrusion in coastal aquifers and the corresponding conditions without tides, the salinization degree and range are significantly increased. Within a single tidal cycle, the degree and range of saline water intrusion in the aquifer fluctuate with the tides, reaching the strongest in the middle of the ebb tide, with a lag compared to the tidal water level changes. Part of the infiltrated salt accumulates in the adjacent shallow aquifer and diffuses to the deep aquifer, and part is discharged to the river with inland groundwater and then flushed to the ocean by inland river water.

Key words: tide; estuarine aquifer; saltwater intrusion; groundwater discharge; numerical simulation

海水入侵是海岸带一种常见的环境地质灾害,严重制约着当地社会经济的可持续发展^[1-2]。目前,海水入侵的研究大多聚焦于海水通过海岸对含水层造成的直接入侵^[3-5],很少关注海水经由河口河流入侵至相邻含水层的过程。事实上,当河流流量减少

时,海洋高盐度水体可在潮汐作用下通过河口快速进入河流,导致河道水体咸化,而河道中的咸化水体在重力作用下将进一步下渗至相邻浅层含水层,造成相邻含水层的咸水入侵^[6-8]。近年来,受气候变化与人类活动的双重影响,河口发生海水入侵的频率

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3211600);国家自然科学基金面上项目(42477061)

作者简介:叶逾(1987—),女,副教授,博士,主要从事地下水动力及溶质运移研究。E-mail: yeyu@hhu.edu.cn

通信作者:鲁春辉(1981—),男,教授,博士,主要从事海岸带地下水保护研究。E-mail: clu@hhu.edu.cn

明显增加,入侵距离增大,进而导致河口相邻含水层咸水入侵程度加重,浅层地下水盐度超标,威胁地下饮用水安全^[9-11]。

河口相邻含水层咸水入侵是典型的咸淡水对流与水盐运移过程。野外监测数据显示,海岸带咸化河水可以通过河床垂直入侵至含水层,该过程的重要性可能被前人低估^[12-14]。河流咸水与相邻浅层含水层淡水之间的密度差异以及区域地下水排泄是控制对流稳定性的主导因素,且河口水位及盐度潮汐波动对相邻含水层的地下水停留时间、盐度、咸水楔形状及流动动态均具有显著影响^[15-19],该影响随着内陆距离的增加而减小^[20]。其中,河流盐度潮汐波动能显著提升地表-地下水交互作用,使河流底部形成指流及局部水循环单元,从而减少地下水停留时间,使得水量交换速率加倍^[21]。上述研究大多限于垂直于河道的二维截面,忽略了潮汐作用下水位和盐度沿河道的变化,会对研究结果造成一定偏差。

本文借助 COMSOL Multiphysics[®]构建平行于河道的二维潮汐河口河流-含水层瞬态全耦合数值模型,通过量化不同工况下的盐分分布及水盐交互通量,初步探究潮汐对河口相邻含水层咸水入侵的影响机制,以期为海岸带地下水可持续利用与地下饮用水安全保障提供理论依据。

1 数值模型

采用 COMSOL Multiphysics[®]进行模型构建,该软件支持耦合多个物理场。本文选用“自由和多孔介质流动”及“多孔介质中的稀物质传递”2个物理场。前者用于计算河流和含水层中的流体流动,后者则用于计算溶质运移。

1.1 控制方程

自由流动物理场控制方程为 N-S 方程:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \mu \left[\nabla^2 \mathbf{u} + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T \right] + \mathbf{F} + \rho \mathbf{g} \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度,kg/m³; $\mathbf{u}$ 为速度矢量,m/s; t 为时间,s; p 为压强,Pa; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; μ 为流体动力黏度,Pa·s; $\mathbf{F}$ 为体积力,N/m³; $\mathbf{g}$ 为重力加速度,m/s²。

多孔介质流动物理场控制方程为 Brinkman 方程:

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \frac{\mathbf{u}}{\varepsilon} = -\nabla p + \left\{ \frac{1}{\varepsilon} \mu \left[\nabla^2 \mathbf{u} + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \right] \right\} - (k^{-1}\mu)\mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (2)$$

式中: ε 为孔隙度; k 为多孔介质的渗透率,m²。

多孔介质中的稀物质传递物理场控制方程为对流-弥散方程:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c - (D_d + D_e) \nabla^2 c + \nabla \cdot (c\mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

式中: c 为浓度,mol/m³; D_d 为机械弥散系数,为横/纵向弥散度与速度之间的乘积,m²/s; D_e 为有效扩散系数,通常取为水动力扩散系数与孔隙度的乘积,m²/s。

1.2 模型设置

根据实际场地情况^[14,19,21]设置二维潮汐河口河流-含水层数值模型,如图 1 所示。区域 BCDE 为自由流动区域,区域 ABEF 为多孔介质区域,其中 AB、EF 长度设为 15 m,BC、DE 长度设为 5 m,CD、BE、AF 长度设为 2 000 m。由于本文重点关注潮汐作用下的河流盐度变化及其与含水层之间的咸淡水交互,模型简化为均质各向同性理想模型。

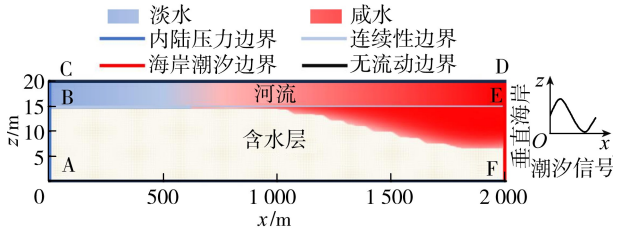


图 1 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model

边界 ABC 为恒定压力及溶质流出边界,不同高度的压强为

$$p = (h_{in} - z)g\rho_w \quad (4)$$

式中: h_{in} 为内陆定水头,m; z 为纵向高度,m; ρ_w 为淡水的密度,kg/m³。

为模拟潮汐海水位的波动,边界 DEF 为变压力及溶质自由边界,不同位置的压强为

$$p = (h - z)g\rho_s \quad (5)$$

其中

$$h = h_s + A \sin(2\pi t/T)$$

式中: ρ_s 为海水密度,kg/m³; h 为潮汐水位,m; h_s 为海侧平均水头,m; A 为潮汐振幅,m; T 为潮汐周期,h。

模型为有限元数值模型。将模型剖分为 20 841 个网格,采用软件自适应方法确定网格大小,最大网格边长为 1.05 m,其 Péclet 数 $Pe \approx \Delta L/\alpha_L = 1$ (ΔL 为网格边长, α_L 为纵向弥散度),满足 $Pe \leq 4$ 的数值稳定性判据^[22]。模型计算过程中采用自适应时间步长。由于本文专注于河口含水层咸水入侵机制,模型中的参数参考前人研究直接给定^[17,23-24]:孔隙度 0.4,渗透率 1×10^{-10} m²,流体动力黏度 1×10^{-3} Pa·s,纵向弥散度 1 m,横向弥散度 0.1 m,水动力扩散系数 1.61×10^{-9} m²/s,淡水密度 1 000 kg/m³,海水密度 1 025 kg/m³,淡水浓度

0 mol/m³, 海水浓度 600 mol/m³, 内陆定水头 20 m, 海侧平均水头 19 m, 潮汐振幅 1.2 m, 潮汐周期 12 h。

为了探明潮汐对河口相邻含水层咸水入侵的范围和影响机制,通过改变边界 DEF 压力条件与区域 BCDE 的流动物理场设置,同时模拟并对比了海岸带、潮汐海岸带、河口、潮汐河口工况的咸水入侵,具体工况及条件设置见表 1。表 1 中海岸带工况指无河口、无潮汐作用的海水入侵情形,潮汐海岸带工况指无河口、有潮汐作用的海水入侵情形,河口工况指无潮汐作用下的河口相邻含水层咸水入侵情形,潮汐河口工况指潮汐作用下的河口相邻含水层咸水入侵情形。海岸带、潮汐海岸带、河口及潮汐河口工况的模拟总时长分别为 69 120、34 560、40 000、6 000 h,此时不同工况均达到准稳态,即相邻时间点之间盐水楔趾部坐标变化小于 10 m。选取各工况不同时间点的模拟结果分别分析准稳态、单周期及长期的咸水入侵与盐分分布情况。

表 1 模拟工况及其条件设置

Table 1 Simulation cases and their setups		
工况	边界 DEF	区域 BCDE
海岸带	定压力	多孔介质
潮汐海岸带	变压力	多孔介质
河口	定压力	自由流动
潮汐河口	变压力	自由流动

2 结果与分析

2.1 准稳态咸水入侵与盐分分布

图 2 为不同工况下含水层中咸水入侵及盐分分布达到准稳态时的情况,为了更好地呈现结果,图 2 所示模型在长度方向缩小为原型的 1/10。由图 2 可知,河流与潮汐对含水层中的咸水入侵均存在显著影响。由图 2(a)(b)可知,海岸带工况中,潮汐作用可以抑制海水入侵,削减入侵的距离,增大混合带,这与前人的研究结果一致^[19,25];由图 2(c)(d)可知,河口工况中,潮汐作用反而增强了咸水入侵相邻含水层的程度,增大了盐分分布范围。潮汐河口工况的咸水入侵范围最大,盐浓度为 60 mol/m³ 的盐趾位置距离海边界 1 191 m,远大于海岸带、潮汐海岸带和河口工况中的 335、257、208 m,且盐分分布与海岸带海水入侵盐水楔形状不同,河口相邻浅层含水层亦存在显著的咸水入侵情况。导致该现象的主要因素是潮汐作用。高潮位时,海水水位高于内陆水位,海水沿着河道迅速入侵河流上游,导致上游河水咸化,在密度梯度的驱动下,河流中的咸化水体通过河床底部进一步入侵相邻浅层含水层,并在河床下部形成盐指,从而使得盐分分布范围较其他工

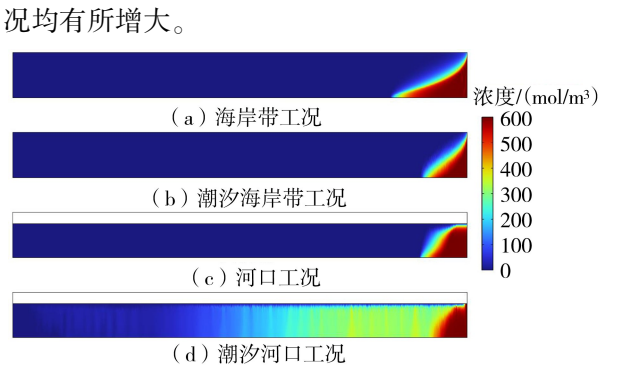


图 2 不同工况下含水层中准稳态咸水入侵及盐分分布

Fig. 2 Quasi steady-state saltwater intrusion and salinity distributions in aquifers in different cases

2.2 单周期内流场与盐分分布

为了进一步探讨潮汐作用下河口相邻含水层中的水流及水盐运移过程,给出了达到稳态前单个潮汐周期内的流场及盐分分布(图 3)。图 3(a)~(e)分别表示第 9 个周期末、第 10 个周期高潮位、落潮中期、低潮位及第 10 个周期末的模拟结果。在第 9 个周期末(图 3(a)),内陆水位高于海水位,河道水流从内陆侧流向海侧。此时,含水层上游水流方向与河道一致,在中部排泄至河流,而在下游入侵盐指的影响下形成局部环流,环流方向为逆时针。海侧含水层则因海水入侵的发生,水流由海侧含水层底部向内陆浅层含水层流动,并形成了梯形咸水入侵区域。当潮汐达到高潮位时(图 3(b)),河道中的流线方向相较于图 3(a)发生反转,随着海水位的升高,海水沿着河道迅速向内陆侧入侵,河道中的高浓度盐水通过河床入渗至相邻浅层含水层中,加剧了含水层咸水入侵。含水层中除了海测的水流方向保持不变外,上游水流方向相反,且局部环流方向变为顺时针。而当海水水位降到平潮位时(图 3(c)),河道内的海水入侵距离达到最远,此时海水开始回退,河道内的流线再次变为由内陆向海侧方向,含水层中的流动方向也回到第

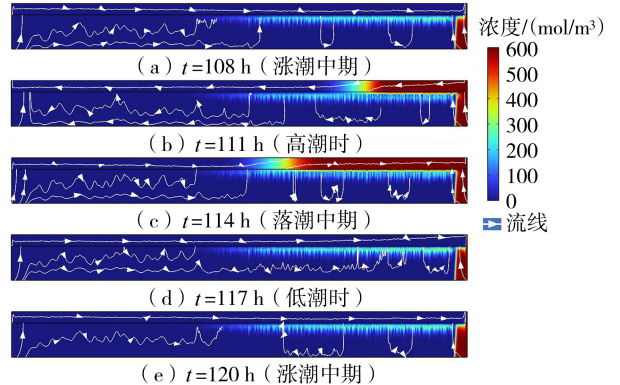


图 3 单个潮汐周期内河流及含水层流场与盐分分布

Fig. 3 Flow fields and salinity distributions in river and aquifer during one tidal cycle

9个周期末的状态。当海水水位达到低潮位时(图3(d)),内陆淡水向海侧冲刷,由于河道内的流速远远大于含水层中的水流流速,河道中的海水几乎完全回退至海侧,而含水层中却仍残留有大量入渗咸水。图3(e)为经历了一个周期后,潮汐再次回到平潮位时河流及含水层中的流场与盐分分布,与上一周期并无显著差别。

单个潮汐周期内含水层盐分分布范围及盐分质量变化情况如图4所示,图中盐分分布范围由10%标准化浓度等值线与边界所围成的区域面积进行量化。

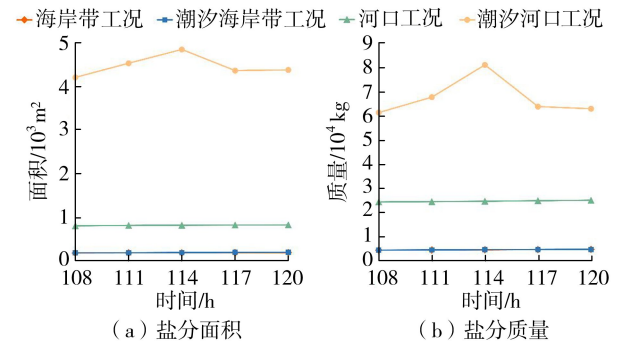


图4 单个潮汐周期内含水层中盐分变化
Fig.4 Salinity variations in aquifer during one tidal cycle

由图4可知,潮汐河口工况下的含水层咸水入侵范围与盐分总质量均比海岸带、潮汐海岸带、河口工况大,且后三者的咸水入侵程度由强到弱依次为河口、潮汐海岸带、海岸带工况,该趋势与图2中准稳态下的盐分分布相对应。在海岸带、潮汐海岸带、河口工况下,咸水入侵范围和程度随着时间的推移均有所增强,但在单周期内的增强程度不明显。相反,潮汐河口工况下含水层中的咸水入侵范围和程度随着海水水位的变化而变化,总体呈现先增强后减弱的趋势。然而,在高潮位($t=111 \text{ h}$),咸水入侵程度并非最强,表明海水水位与含水层咸水入侵程度达到最大值的时刻并不一致,即含水层咸水入侵相较于潮汐水位变化具有滞后性,这与前人研究中河口咸潮上溯程度最强时刻晚于海水水位峰值时刻的结论^[6]相似。对比第9个和第10个周期末潮汐河口工况下含水层中的盐分总质量可以发现,盐分发生了累积,累积量为1582 kg,比海岸带、潮汐海岸带和河口工况中盐分在一个周期内的累积量分别多402%、404%和128%。

图5为潮汐河口工况中单个潮汐周期内不同时间点的盐通量空间分布,图5(a)为河道与含水层交界线上的法向盐通量,图5(b)为距海侧边界20 m处的法向盐通量。两处法向盐通量空间分布可定量描绘水盐在含水层、河流及海洋之间的交互情况。

取第108、111、114、117、120 h进行分析,并规定盐分流出含水层时通量为正,盐分流入为负。

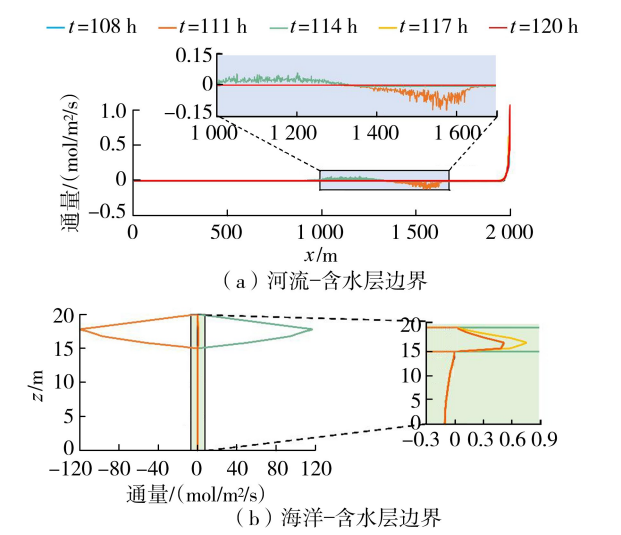


图5 单个潮汐周期内不同时间点的边界盐通量
Fig.5 Salt flux across boundaries at different time points during one tidal cycle

由图5(a)可知,海水达到高潮位($t=111 \text{ h}$)时,盐分通过河道入渗至含水层,由于此时河道中的海水入侵距离还未到达最远,盐通量负值局部峰值位置出现在下游,与图3(b)相互对应。在落潮中期($t=114 \text{ h}$),咸水开始回退,含水层中的内陆淡水在中部位置向河道排泄(图3(c)),将含水层中的咸水带离含水层,故盐通量变为正值。海侧含水层中的入侵海水经由河道不断排泄至海洋(图3),使得海侧的盐通量值在不同潮汐时刻均为正值。

由图5(b)可知,海水达到高潮位($t=111 \text{ h}$)时,咸水由河道大量入侵河口,成为图5(a)中河道入侵相邻浅层含水层盐分的来源,此时河道中的盐通量为负。在落潮中期($t=114 \text{ h}$),河道咸水回退,盐通量为正值。随着时间的推移,河道中的咸水回退量逐步减少,经历低潮($t=117 \text{ h}$),在涨潮中期($t=120 \text{ h}$)降至最低水平,此时河道中的盐通量主要来源于海侧含水层中盐分的排泄(图3)。此外,图5(b)中 $z=0 \sim 15 \text{ m}$ 处的盐通量不随时间发生明显波动且始终为负值,表明在密度梯度的驱动下,含水层海侧边界发生了海水入侵,并逐渐形成盐水楔。

2.3 流场与盐分分布的长期变化

图6为第25、50、100、200、400、500个潮汐周期末河口相邻含水层的盐分分布,上述时间点的海水水位均处于涨潮中期。随着海水持续入侵河口上游河道,咸水在含水层顶部形成盐指并持续积累,在密度梯度、盐指局部环流及重力作用下,盐分持续向含水层底部和盐指周围运移、扩散。同时,含水层海侧边界处形成梯形盐水楔,随着时间的推移,盐水楔趾

部逐渐向陆侧延伸。在 $t=6\,000\text{ h}$ 左右,盐指的发育和盐水楔入侵的范围基本达到最大程度,河道咸水上溯最远距离内的含水层中充满咸水。

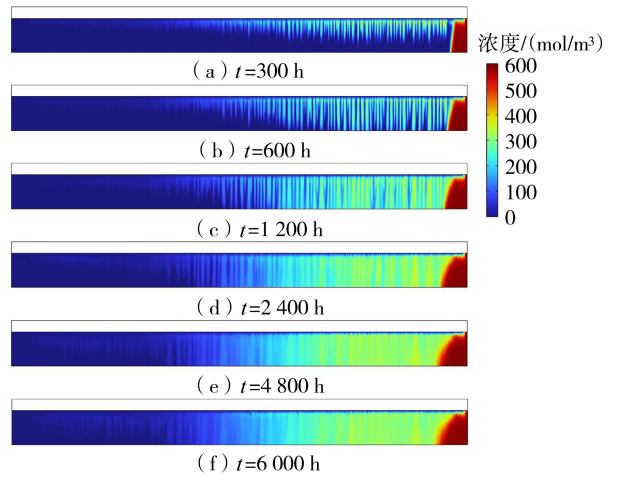


图 6 不同潮汐周期含水层流场及盐分分布
Fig. 6 Flow fields and salinity distributions in aquifer during different tidal cycles

长时期盐分在含水层中的入侵程度同样采用含水层中盐分分布面积和总盐质量进行衡量,如图 7 所示。潮汐河口工况下的咸水入侵程度逐渐增强,在第 500 个潮汐周期末基本稳定,而其他工况下的咸水入侵程度则持续增强,在第 500 个潮汐周期末未观察到稳定的迹象。相较于图 4 单个潮汐周期内的咸水入侵,图 7 中 4 种工况的趋势维持不变,潮汐河口工况下的咸水入侵面积和盐分积累量最大,河口工况次之,海岸带和潮汐海岸带工况比较接近。在第 500 个周期末,潮汐河口工况盐分分布范围为海岸带工况的 12. 23 倍,总盐质量为海岸带工况的 7. 79 倍。长期来看,潮汐对河口相邻含水层咸水入侵的作用仍非常显著,在第 500 个潮汐周期末,潮汐河口工况中盐分分布范围为河口工况的 6. 24 倍,总盐质量为河口工况的 3. 97 倍。

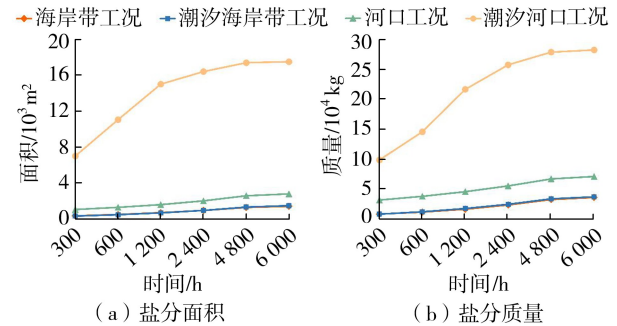


图 7 不同潮汐周期含水层中盐分变化
Fig. 7 Salinity variations in aquifer during different tidal cycles

图 8 为潮汐河口工况下第 25、50、100、200、400、500 个潮汐周期末的盐分质心位置和扩散程

度,由一阶矩和二阶中心矩表示。其中,一阶矩的计算方程为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i c_i}{\sum_{i=1}^n c_i} \tag{6}$$

$$\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i c_i}{\sum_{i=1}^n c_i} \tag{7}$$

式中: n 为网格数; c_i 为网格 i 的浓度, mol/m^3 ; x_i 、 z_i 分别为网格 i 的坐标值, m 。

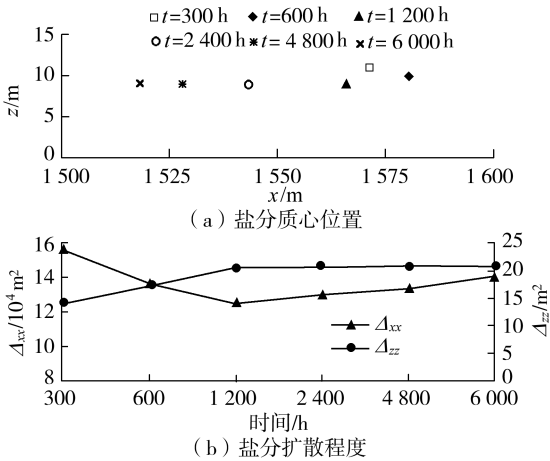


图 8 不同潮汐周期含水层中盐分中心距
Fig. 8 Central moments of the salinity in aquifer during different tidal cycles

二阶中心矩的计算方程为

$$\Delta_{xx} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n c_i} \tag{8}$$

$$\Delta_{zz} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i (z_i - \bar{z})^2}{\sum_{i=1}^n c_i} \tag{9}$$

由图 8(a) 可知,入侵盐分的质心位置随时间的推移大体向下向左移动,表明潮汐作用下,河口相邻含水层咸水入侵不断向含水层底部与内陆侧移动,入侵范围不断扩大,这与图 6 中盐分的分布形态变化相一致。但 $t=300\text{ h}$ 时刻的入侵盐分的质心位置要在 $t=600\text{ h}$ 时刻的左上方,可能原因是在咸水入侵初期,盐水楔没有完全形成,但河道上游已经广泛分布有入侵至相邻含水层的盐指,使得入侵盐分的质心位置偏向内陆一侧和含水层上部。由图 8(b) 可知, x 方向上的盐分扩散先减小后增加,在第 100 个周期前,盐水通过河口迅速入侵河道上游,并渗入至相邻含水层,使得初始阶段 x 方向上的二阶中心距较大,随着盐水楔逐渐向内陆一侧扩大,含水层中盐分开始变得均匀一些, x 方向二阶中心距逐渐减小。第 100 个周期后,随时间的推移,盐水楔只有在趾部缓慢向内陆一侧入侵,而盐指逐渐成长并充满整个盐水入侵区域,含水层中盐分进一步积累,使得盐分在 x 方向上的扩散程度逐渐增加。 z 方向的盐分扩散从第 25 个周期到第 100 个周期因

密度驱动对流而显著增大,之后由于盐分积聚到底部且扩散空间受到限制,扩散程度趋于平稳。

3 结 论

a. 潮汐作用下,海水通过河口迅速进入河流上游,在密度梯度的驱动下入渗至相邻浅层含水层,形成盐指及局部环流,使得上游含水层咸化,潮汐河口相邻含水层咸水入侵程度和范围显著大于海岸带海水入侵及河口无潮汐作用下的含水层咸水入侵。

b. 单个潮汐周期内,潮汐河口相邻含水层中的咸水入侵程度与范围随潮汐波动。海水达到高潮位时,盐分通过河道入渗至含水层,落潮中期,含水层中的咸水开始向河道排泄,含水层咸水入侵程度在落潮中期达到最强,相较潮汐水位变化具有滞后性。

c. 通过河流入侵至相邻浅层含水层的盐分部分在含水层中积累,并随时间持续向深层含水层和内陆扩散,部分随内陆地下水排泄渗出含水层至河道,而后经由河道冲刷至海洋。

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. Sustainability associated coastal eco-environmental problems and coastal science development in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2016,31(10):1133-1142. (in Chinese))

[2] 王焰新,甘义群,邓娅敏,等. 海岸带海陆交互作用过程及其生态环境效应研究进展[J]. 地质科技通报,2020,39(1): 1-10. (WANG Yanxin, GAN Yiqun, DENG Yamin, et al. Land-ocean interactions and their eco-environmental effects in the coastal zone:current progress and future perspectives[J]. Bulletin of Geological Science and Technology,2020,39(1):1-10. (in Chinese))

[3] STRACK O D L. A single-potential solution for regional interface problems in coastal aquifers [J]. Water Resources Research,1976,12(6):1165-1174.

[4] 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))

[5] 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.

[6] 尹小玲,赵雪峰. 径潮共同作用对径流型河口盐水上溯

的影响[J]. 水科学进展,2018,29(1):118-126. (YIN Xiaoling, ZHAO Xuefeng. Combined influences of runoff and tide on saline intrusion length in riverine estuary[J]. Advances in Water Science,2018,29(1):118-126. (in Chinese))

[7] LINDERFELT W R, TURNER J V. Interaction between shallow groundwater, saline surface water and nutrient discharge in a seasonal estuary:the Swan-Canning system [J]. Hydrological Processes,2001,15(13):2631-2653.

[8] NAVOY A S, VORONIN L M, MODICA E. Vulnerability of production wells in the Potomac-Raritan-Magothy Aquifer system to saltwater intrusion from the Delaware River in Camden, Gloucester, and Salem counties, New Jersey[R]. Denver:U. S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey,2005.

[9] 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. (in Chinese))

[10] 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))

[11] 黄雅丽,盛晟,胡朝阳,等. 感潮河段枯水期盐度模型构建与咸潮上溯影响研究[J]. 水资源保护,2025,41(1): 150-159. (HUANG Yali, SHENG Sheng, HU Zhaoyang, et al. Construction of salinity model for tidal reaches during dry seasons and study on influence of saltwater intrusion[J]. Water Resources Protection,2025,41(1):150-159. (in Chinese))

[12] HAN Dongmei, 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.

[13] CAO Tianzheng, HAN Dongmei, SONG Xianfang, et al. Subsurface hydrological processes and groundwater residence time in a coastal alluvium aquifer:evidence from environmental tracers ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, CFCs, ^3H) combined with hydrochemistry [J]. Science of the Total Environment,2020,743:140684.

[14] SETIAWAN I, MORGAN L K, DOSCHER C. Saltwater intrusion from an estuarine river;a field investigation[J]. Journal of Hydrology,2023,617:128955.

[15] SMITH A J, TURNER J V. Density-dependent surface water-groundwater interaction and nutrient discharge in the

Swan-Canning Estuary[J]. Hydrological Processes,2001, 15(13):2595-2616.

[16] WERNER A D, LOCKINGTON D A. Tidal impacts on riparian salinities near estuaries[J]. Journal of Hydrology, 2006,328(3/4):511-522.

[17] LENKOPANE M,WERNER A D,LOCKINGTON D A,et al. Influence of variable salinity conditions in a tidal creek on riparian groundwater flow and salinity dynamics[J]. Journal of Hydrology,2009,375(3/4):536-545.

[18] TREFRY M G,SVENSSON T J A,DAVIS G B. Hypoagig influences on groundwater flux to a seasonally saline river [J]. Journal of Hydrology,2007,335(3/4):330-353.

[19] ZHANG Bo, ZHENG Tianyuan, ZHENG Xilai, et al. Dynamics of upstream saltwater intrusion driven by tidal river in coastal aquifers [J]. Science of the Total Environment,2023,877:162857.

[20] MAO X,ENOT P,BARRY D A,et al. Tidal influence on behaviour of a coastal aquifer adjacent to a low-relief estuary[J]. Journal of Hydrology, 2006, 327(1/2):110-127.

[21] XIAO Kai, LI Hailong, XIA Yuqiang, 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.

[22] HUYAKORN P S, PINDER G F. Computational methods in subsurface flow[M]. New York: Academic Press, 1983: 473.

[23] 孙昭华,严鑫,谢翠松,等. 长江口北支倒灌影响区盐度预测经验模型[J]. 水科学进展,2017,28(2):213-222. (SUN Zhaohua, YAN Xin, XIE Cuisong, et al. An empirical predictive model for saltwater intrusion in the South Branch influenced by tidal flow from the North Branch in the Yangtze River Estuary [J]. Advances in Water Science,2017,28(2):213-222. (in Chinese))

[24] ZHANG Jiaxu, LU Chunhui, SHEN Chengji, et al. Effects of a low-permeability layer on unstable flow pattern and land-sourced solute transport in coastal aquifers [J]. Journal of Hydrology,2021,598:126397.

[25] 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. (收稿日期:2024-11-15 编辑:刘晓艳)

+++++

(上接第257页)

[46] ZHANG Liangliang, LI Tianxiao, LIU Dong, et al. Spatial variability and possible cause analysis of regional precipitation complexity based on optimized sample entropy[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2020,146(732):3384-3398.

[47] ZHOU Yan, ZHANG Xinrui, CHEN Yingshan, et al. A water-land-energy-carbon nexus evaluation of agricultural sustainability under multiple uncertainties: the application of a multi-attribute group decision method determined by an interval-valued intuitionistic fuzzy set [J]. Expert Systems with Applications,2024,242:122833.

[48] WANG Yong, XIE Yanjing, QI Lin, et al. Synergies evaluation and influencing factors analysis of the water-energy-food nexus from symbiosis perspective: a case study in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Science of the Total Environment,2022,818:151731.

[49] 洪思扬,程涛,王佳友,等. 贸易视角下广东省水-能源-粮食流通与资源间压力互馈研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(6):48-57. (HONG Siyang, CHENG Tao, WANG Jiayou, et al. Research on water-energy-food circulation and interaction pressure between resources in Guangdong Province from perspective of trade[J]. Water Resources Protection,2024,40(6):48-57. (in Chinese))

[50] CHEN Jian, YANG Shentian, LI Hongwei, et al. Research on geographical environment unit division based on the method of natural breaks (Jenks) [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,2013,40:47-50.

[51] 郝帅,孙才志,翟小清. 中国水资源-能源-粮食系统效率时空格局及影响因素[J]. 地理学报,2024,79(9):2389-2406. (HAO Shuai, SUN Caizhi, ZHAI Xiaoqing. Spatio-temporal pattern and influencing factors of efficiency of water-energy-food system in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(9):2389-2406. (in Chinese))

[52] 王勇,孙瑞欣. 土地利用变化对区域水-能源-粮食系统耦合协调度的影响:以京津冀城市群为研究对象[J]. 自然资源学报,2022,37(3):582-599. (WANG Yong, SUN Ruixin. Impact of land use change on coupling coordination degree of regional water-energy-food system: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Journal of Natural Resources,2022,37(3):582-599. (in Chinese)) (收稿日期:2025-01-13 编辑:熊水斌)

