

砂箱模型中底板倾斜角度对承压含水层海水入侵的影响研究

林国庆¹,徐亚茹¹,刘中业²,纪汶龙²,黄卓雄³,莫位明³

(1. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室,山东 青岛 266100;

2. 山东省地质调查院,山东 济南 250014; 3. 海南地质综合勘察设计院,海南 海口 570206)

摘要:滨海地区普遍存在向海倾斜的承压含水层,但含水层底板的倾斜角度对海水入侵的影响程度仍不清楚。本研究利用室内砂箱试验,并应用显色示踪技术,综合分析不同底板倾斜角度承压含水层海水入侵的动态过程,探究海平面高度、地下淡水流量和含水层岩性对向海倾斜的承压含水层海水入侵的影响。研究发现,底板倾斜角度对承压含水层的海水入侵有显著影响。在咸淡水界面稳定时,底板倾斜角度与咸水楔长度之间存在指数函数关系,咸水楔长度随倾斜角度的增加而减少。在定水头条件下,底板倾斜角度的增加导致地下淡水排泄量减少。在定流量边界条件下,尽管底板倾斜角度的变化不影响地下淡水排泄量,但咸水楔面积却随倾斜角度的增加而减小。当含水层岩性从粗砂变为细砂时,由于其渗透系数降低,咸水楔长度减少,尤其是在定流量条件下,其缩短更为显著。研究表明,对于向海倾斜的承压含水层,底板倾斜角度较小时,海平面升高和地下淡水流量减少对海水入侵的影响更加显著。

关键词:海水入侵;底板倾斜;室内试验;承压含水层

中图分类号:X523

文献标志码:A

Impact of bottom slope angles in sand tank model on seawater intrusion in confined aquifers

LIN Guoqing¹, XU Yaru¹, LIU Zhongye², JI Wenlong², HUANG Zhuoxiong³, MO Weiming³

(1. Key Laboratory of Marine Environment & Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China,

Qingdao 266100, China; 2. Shandong Provincial Geological Survey Institute, Jinan 250014, China;

3. Hainan Geological Comprehensive Exploration and Design Institute, Haikou 570206, China)

Abstract: In coastal regions, there is a widespread presence of confined aquifers sloping seaward, but the impact of the aquitard's bottom slope angle on seawater intrusion remains unclear. In this paper, laboratory sandbox experiments employing color tracing technology were first conducted to analyze the dynamic process of seawater intrusion into confined aquifers under various bottom slope angles. The impact characteristics of sea level height, the amount of subterranean freshwater discharge, and aquifer lithology on seawater intrusion into seaward sloping confined aquifers were then investigated. The results demonstrate that the bottom slope angles significantly affects seawater intrusion into confined aquifers. When the interface between saline and freshwater during seawater intrusion stabilizes, there exists an exponential function relationship between the bottom slope angle and the length

收稿日期:2023-11-14

基金项目:国家重点研发计划“大气与土壤、地下水污染综合治理”重点专项(2023YFC3709002);山东省自然资源厅地质勘查项目(鲁勘字(2022)3号)

作者简介:林国庆(1977—),男,山东乳山人,副教授,博士,主要从事滨海土壤、地下水污染调查与修复。

E-mail:lingq@ouc.edu.cn

黄卓雄(1977—),男,海南东方人,正高级工程师,主要从事海洋地质调查、监测与评估,本文通信作者。

E-mail:11972708@qq.com

of the saltwater wedge; the length of the saltwater wedge decreases as the slope angle increases. Under constant head conditions, the discharge of subterranean freshwater decreases with the increase of the bottom slope angle. Under constant flow boundary conditions, although changes in bottom slope angles have no impact on subterranean freshwater discharge, the area of the saltwater wedge consistently decreases with an increase of the slope angle. When the lithology changes from coarse sand to fine sand in inclined aquifer, the length of saltwater wedge shortens as the hydraulic conductivity of the aquifer decreases, and the shortening becomes the greatest under constant-flow conditions. For confined aquifers sloping seaward, the smaller the bottom slope angle is, the greater the impact of sea level rise and subterranean freshwater discharge on the degree of seawater intrusion becomes.

Key words: seawater intrusion; bottom slope angle; laboratory experiment; confined aquifer

由于自然和人为因素的双重影响,全球许多地区面临 0.5~100 km 范围内的海水入侵问题^[1-2]。海水入侵不仅导致滨海陆地含水层的地下淡水咸化^[3],进而减少淡水资源的可用量,还会引发沿海地区土壤盐渍化,降低土壤质量,造成农业减产^[4]。

海水入侵的影响因素主要分为自然因素和人为因素。自然条件下,气候变化导致海岸带的地下淡水流量减少和海平面升高^[5];人为因素方面,沿海地区过度抽取地下水也会造成地下水位下降^[6]。因此,海平面高度或地下淡水流量常作为研究海水入侵的关键参数^[7]。Abd-Elhamid 等^[8]研究表明,海平面上升和淡水水位下降会加剧海水入侵,且在水力梯度保持不变的情况下,海平面上升比淡水水位下降更易加剧海水入侵的发生。Abdoulhalik 等^[9]通过室内实验定量评估了顶部为低渗透层的承压含水层时,海平面升高对咸水楔的影响,并发现海平面上升会削弱低渗透层对海水入侵的抑制作用。

目前对海水入侵的研究方法主要包括解析法、室内实验法和数值模拟法。解析法能够快速精确地确定咸淡水界面的位置,室内实验法的优点在于能够直观地观察到海水入侵的动态过程,而数值模拟法能够模拟诸多复杂的水文地质条件和人为因素影响下咸淡水过渡带的运移规律。例如,谢一凡等^[10]利用室内试验和 SUTRA 模型分析了含水层裂隙对海水入侵特征(如咸水楔、咸淡水混合带)的影响。Koussis 等^[11]通过解析模型中参数的修正,提高了变密度流中咸淡水界面位置的准确度。目前海水入侵的研究多集中在水平含水层,而自然环境普遍存在向海倾斜的含水层^[12-13]。Lu 等^[14]推导了倾斜承压含水层中咸淡水界面稳态位置的解析解。Abarca 等^[15]通过 SUTRA 模型的数值模拟,发现在 0.57°~5.7°倾斜角度下,含水层的海水入侵明显受到底板倾斜角度的影响。但目前仍缺乏通过室内试验定量分析底板倾斜角度对承压含水层海水入侵过程的影响。

莱州湾是我国海水入侵最严重的地区之一。区内地形南高北低,由陆地向海洋倾斜。基于该区水文地质条件差异,将含水层细分为三种水文地质亚区^[16]:①松散沉积物构成的含水层,具有淡水和咸水两层结构;②同样由松散沉积物构成,但呈现淡水-咸水-淡水的三层结构;③由未固结沉积物构成,包括咸水和淡水两层结构。在垂直方向上,这些含水层分别对应潜水含水层、第一承压咸水层和第二承压咸水层。这些承压含水层的底板存在 2°~17°的倾斜角度^[17]。受滨海地区地下水过度开采的影响,海水入侵问题日益加剧。

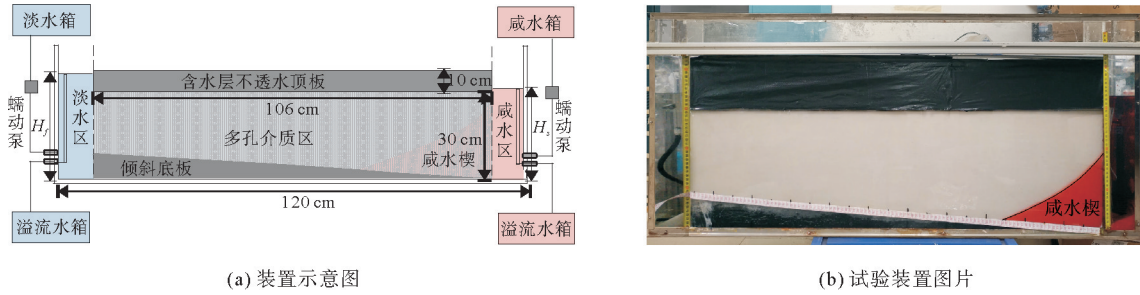
本研究通过室内二维砂箱模型,结合显色示踪技术,定量评估莱州湾南岸向海倾斜承压含水层海水入侵的动态过程,深入分析底板倾斜角度、地下淡水流量、海平面高度以及含水层岩性等因素对海水入侵过程的影响,为滨海地区海水入侵的防治提供理论支持。

1 试验设计

1.1 试验装置

本研究采用室内砂箱模型进行显色示踪试验^[18],评估底板倾斜角度如何影响滨海承压含水层中的海水入侵。如图 1 所示,砂箱长 120 cm、宽 10 cm 和高 55 cm,内部通过多孔隔板划分为三个区域:淡水区、多孔介质区和咸水区。其中,淡水区和咸水区分别安装高度可调的溢流管,以便于控制淡水水位(H_1)和咸水水位(H_2)。溢流管的设计确保了水位的精确调节和稳定。多孔介质区下层倾斜底板采用耐海水腐蚀的可发性聚乙烯(expandable polyethylene, EPE)材料制成,斜坡的倾斜角度分别为 5°、10°、15°,其上充填粗砂(粒

径 0.5~0.7 mm)和细砂(粒径 0.2~0.4 mm);上覆 EPE 材料制成的 10 cm 厚的含水层不透水顶板,从而形成 30 cm 厚的承压含水层。为确保斜坡的严格隔水,使用密封胶和隔水布进行密封处理。



(a) 装置示意图

(b) 试验装置图片

图 1 试验装置图

Fig. 1 Diagram of the experiment setup

试验选用无毒无味的胭脂红作为示踪剂。为了确保扩散过程能被清晰地追踪,本研究采用对胭脂红无吸附作用的白色石英砂作为多孔介质,以保证实验结果的准确性。实验中分别采用粗砂和细砂充填承压含水层,平均渗透系数分别为 2.09×10^{-3} 和 8.13×10^{-4} m/s。淡水采用自来水,为消除微生物的影响,将水煮沸后自然冷却至室温。向淡水中添加 NaCl 和胭脂红,配置的密度为 1.025 g/cm^3 、胭脂红浓度为 1 g/L。

1.2 实验方法

为了深入研究底板倾斜角度、地下淡水流量、海平面高度以及含水层岩性等因素对海水入侵过程的影响,本研究分别采用定水头和定流量实验,共进行了 48 组实验。

1) 定水头实验。实验中保持淡水区的水位 H_f 恒定在 35.0 cm,将咸水区水位 H_s 分别设置为 33.2、33.5、33.8 cm,形成 3 种水头差 ΔH : 1.8、1.5、1.2 cm。探究底板倾斜角度分别为 0° 、 5° 、 10° 、 15° 时上述水头差对向海倾斜承压含水层海水入侵动态过程的影响。

2) 定流量实验。保持咸水区的水位在 33.0 cm,将淡水流量分别设置为 43.4、35.3、23.5 mL/min,模拟不同流量条件下,倾斜角度分别为 0° 、 5° 、 10° 、 15° 时承压含水层中海水入侵的动态过程。

实验步骤如下:

- 1) 将砂箱多孔介质区内充满淡水并达到饱和状态,确保地下水以稳定流速从咸水区的溢流口排出;
- 2) 开启咸水泵,让海水迅速充满咸水区,当砂箱多孔介质区中出现红色咸水楔,表示海水入侵开始,此时开始计时;
- 3) 实验过程中,每隔 30 s 用数码相机拍摄一张照片,记录海水入侵过程中咸水楔的形态变化。

1.3 量化指标

地下淡水排泄量(v_1)指流入咸水区的地下淡水体积,可以通过式(1)计算:

$$v_1 = \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)v_2}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (1)$$

式中: σ_1 为淡水区电导率, σ_2 为咸水区溢流管排出的微咸水电导率, σ_3 为咸水区电导率, v_2 为咸水区溢流管排出的微咸水体积。

海水入侵系数(R)用于描述底板倾斜角度对海水入侵的影响程度^[19],

$$R = \frac{L_0 - L}{L_0} \quad (2)$$

式中: L_0 为承压含水层中咸水楔的初始长度, L 为底板倾斜角度改变后的咸水楔长度。

当 $R > 0$ 时,底板倾斜角度的增加会阻碍海水入侵的过程;当 $R = 0$ 时,底板倾斜角度的变化对海水入侵没有任何影响;当 $R < 0$ 时,底板倾斜角度的增加会促进海水入侵。

2 结果与讨论

2.1 不同底板倾斜角度下海水入侵的动态变化特征

图 2 展示了不同底板倾斜角度下,咸水楔长度(咸淡水界面与底部边界交点距咸水边界的长度)随海水入侵时间的动态变化。其变化过程可以划分 3 个阶段:①快速增长阶段,持续 2~3 h,期间咸水楔长度随时间以线性方式迅速增长,但在不同倾斜角度下,咸水楔长度的增长曲线几乎一致;②缓慢增长阶段,此阶段的特点是咸水楔长度每小时的生长量均小于 10 cm,且随着时间的推移,单位时间内咸水楔长度的增长量逐渐减小;③稳定阶段,经过初期的快速增长和随后的缓慢增长阶段后,咸水楔长度达到稳定状态,1 h 内咸水楔长度的变化小于 1 mm。

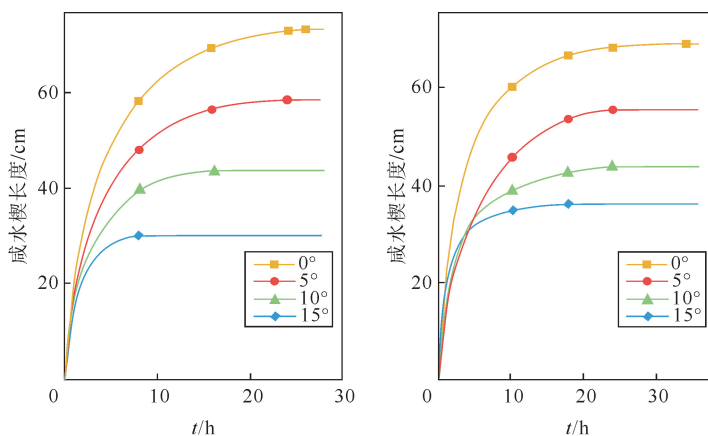
由图 2(a)可以看出,在定水头试验中,当含水层的倾斜角度为 0° 时,海水入侵达到稳定状态所需的时间为 26 h。而当含水层的倾斜角度增至 15° 时,海水入侵达到稳定的时间缩短至 8 h,减少了 69.3%。由图 2(b)可以看出,在定流量试验中,地下淡水流量为 23.5 mL/min 时,水平含水层达到稳定状态需要 34 h,而在倾斜角度 15° 的含水层中,稳定时间减少至 18 h,降低了 47.1%。因此,增加含水层底板的倾斜角度可以显著减少海水入侵达到稳定状态的时间。具体

来说,随着倾斜角度的增大,咸水楔长度停止增加所需的时间减少,意味着海水入侵的稳定状态可以在更短的时间内实现。表明在定水头(图 2(a))和定流量(图 2(b))两种试验条件下,底板倾斜角度的增加对于加速海水入侵过程的稳定化具有明显的促进作用。

由图 2(a)可以看出,在定水头试验中,当含水层底板保持水平并运行 5 h 后,咸水楔的长度达 49.4 cm。当底板倾斜角度为 15° 时咸水楔的长度减少至 28.4 cm,减少了 21.0 cm。由图 2(b)可以看出,在定流量试验中,当地下淡水流量为 23.5 mL/min 时,在海水入侵 10 h 后进行测量,水平含水层中咸水楔的长度为 60.3 cm,在倾斜角度为 15° 的含水层中咸水楔长度减至 34.9 cm,比水平状态减少了 42.1%。因此,在两种试验条件下,增加含水层底板的倾斜角度对减缓海水入侵有显著的阻碍作用。

2.2 不同底板倾斜角度下海水入侵的稳态特征

由图 3(a)可知,定水头试验中,在咸水水位 33.5 cm、淡水水位 35.0 cm 时,海水入侵达到稳定状态,倾斜角度为 5° 的咸水楔长度减少至 41.0 cm, R_1 为 0.20(水平含水层中的咸水楔长度为 51.5 cm);当倾斜角度为 10° 时咸水楔长度进一步减少至 30.5 cm, R_2 为 0.26;在最大倾斜角度 15° 的含水层中,咸水楔长度减少至 20.0 cm, R_3 为 0.34, $R_1 < R_2 < R_3$,且随着倾斜角度的增加,海水入侵的抑制作用明显增强。在定流量试验中,当地下淡水流量为 23.5 mL/min 时(图 3(b)),水平含水层中咸水楔的长度为 69.1 cm,在倾斜角度分别为 5° 、 10° 和 15° 的含水层中,咸水楔长度分别为 55.8、43.9 和 33.8 cm,同样表明随着倾斜角度的增加,海水入侵的抑制作用增强。通过分析发现,咸水楔长度与底板倾斜角度之间存在指数函数关系 $y = a e^{bx}$,平均拟合优度 $\overline{R^2}$ 高达 0.992,说明该数学关系能较精确地描述倾斜角度对海水入侵的影响。因此,定水头试验和定流量试验均表明,含水层底板的倾斜角度越大,海水入侵的抑制作用越强,咸水楔的长度越少。



(a) 咸水区水位 33.8 cm 的定水头试验 (b) 地下淡水流量 23.5 mL/min 的定流量试验

图 2 不同边界条件下底板倾斜角度为 0° 、 5° 、 10° 和 15° 时咸水楔长度变化曲线

Fig. 2 Change curves of seawater wedge length for bottom slope angle at 0° , 5° , 10° and 15° under different boundary conditions

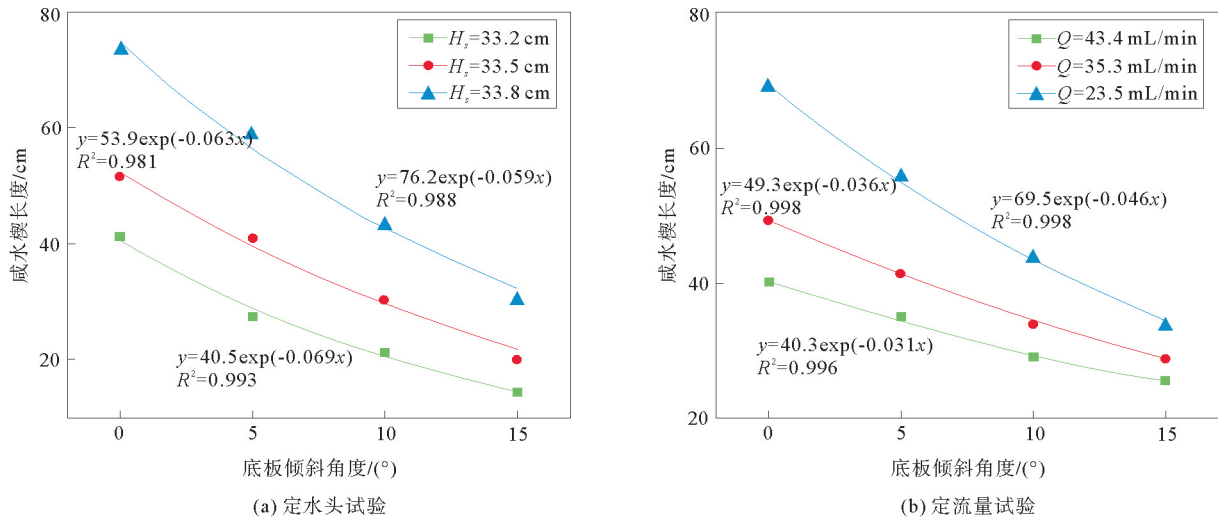


图 3 底板倾斜角度与稳态下咸水楔长度的关系图

Fig. 3 Relationships between bottom slope angle and steady-state length of the saltwater wedge

表 1 为不同条件下倾斜含水层中海水入侵达到稳定状态时的咸水楔面积。由表 1 可知,在定水头试验中,当咸水水位 33.2 cm 时,水平承压含水层的咸水楔面积为 400 cm²。随着底板倾斜角度每增大 5°,咸水楔面积依次减小 187、59、61 cm²。特别是在倾角为 15°的承压含水层中,咸水楔面积比水平含水层减少了 76.7%。咸水区水位分别恒定为 33.5 和 33.8 cm 时,倾斜角度 15°的含水层的咸水楔面积分别比水平含水层减少了 76.1%和 68.1%,表明咸水水位为 33.2 cm 时,咸水楔面积减少最多。在定流量试验中,当含水层底板倾斜角度从 0°增至 15°、地下淡水流量 Q 分别为 23.5、35.3 和 43.4 mL/min 时,咸水楔面积分别减少 74.3%、71.8%和 66.5%。两种试验均表明,咸水楔面积随底板倾斜角度的增加而减少,且在海平面较低或地下淡水流量较大的条件下,倾斜角度的变化对咸水楔面积的影响尤为显著。

表 1 底板倾斜角度为 0°、5°、10°和 15°时的咸水楔面积

Table 1 Saltwater wedge area at bottom plate slope angles of 0°, 5°, 10° and 15° cm²

角度/(°)	H _s =33.2 cm	H _s =33.5 cm	H _s =33.8 cm	Q=43.4 mL/min	Q=35.3 mL/min	Q=23.5 mL/min
0	400	564	830	514	649	865
5	213	343	588	238	313	496
10	154	220	315	201	301	263
15	93	135	201	172	183	222

图 4 为海水入侵达到稳定状态时咸淡水界面的形态。如图 4 所示,随着底板倾斜角度从 5°增至 15°,咸淡水分界面由一个相对平缓的抛物线形状转变为下凹的形状,且咸淡水分界面的下凹程度随着含水层底板倾斜角度的增加而加强。此外,在水平含水层条件下,近海侧的咸淡水分界面会出现近似水平的下凹现象,原因是海水入侵风险较高的含水层中(即咸水区水位较高或地下淡水流量较小的情况下),海水的入侵深度较大,导致近海侧咸水楔的厚度增加,进而压缩了淡水的排泄空间,阻碍了含水层中淡水的自然排泄。因此,在咸淡水分界面的近海侧观察到的近似水平的下凹现象,反映了海水入侵对含水层淡水排泄能力的影响。

图 5 显示了地下淡水排泄量随含水层底板倾斜角度变化的趋势。由图 5(a)可知,在定水头试验中,当咸水区水位保持在 33.2 cm 且含水层底板水平时,地下淡水的排泄量为 40.5 mL/min。但当含水层的底板倾斜角度为 15°时,地下淡水排泄量减至 19.0 mL/min,减少了 53.1%。表明在咸水区水位固定的情况下,含水层底板倾斜角度的增加会导致地下淡水排泄量线性减少,而这种降低趋势受到海平面高度的影响。由

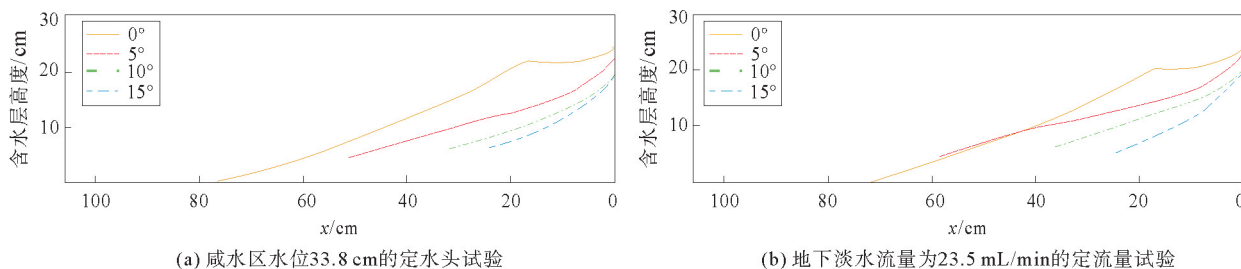


图 4 不同边界条件下咸淡水界面分布图

Fig. 4 Distribution of the salt water-freshwater interface under different boundary conditions

图 5(b)可知,在定流量试验中,在地下淡水流量固定的条件下,地下淡水排泄量基本不受底板倾斜角度的影响,与地下淡水流量保持一致。线性拟合结果表明,回归系数接近 0,说明在定流量试验中,地下淡水排泄量不受底板倾斜角度的影响,其主要驱动因素是水力梯度。在定水头试验中,由于咸淡水两侧的水力梯度保持不变,随着底板倾斜角度的增大,含水层淡水侧的有效过水断面高度减小,导致地下淡水排泄量减少。而在定流量试验中,尽管底板倾斜导致过水断面高度减小,但地下淡水流量的恒定使得淡水区的水位升高,从而形成新的水力梯度,使得地下淡水排泄量基本保持不变,仅在咸淡水分界面附近发生一些微小变化。

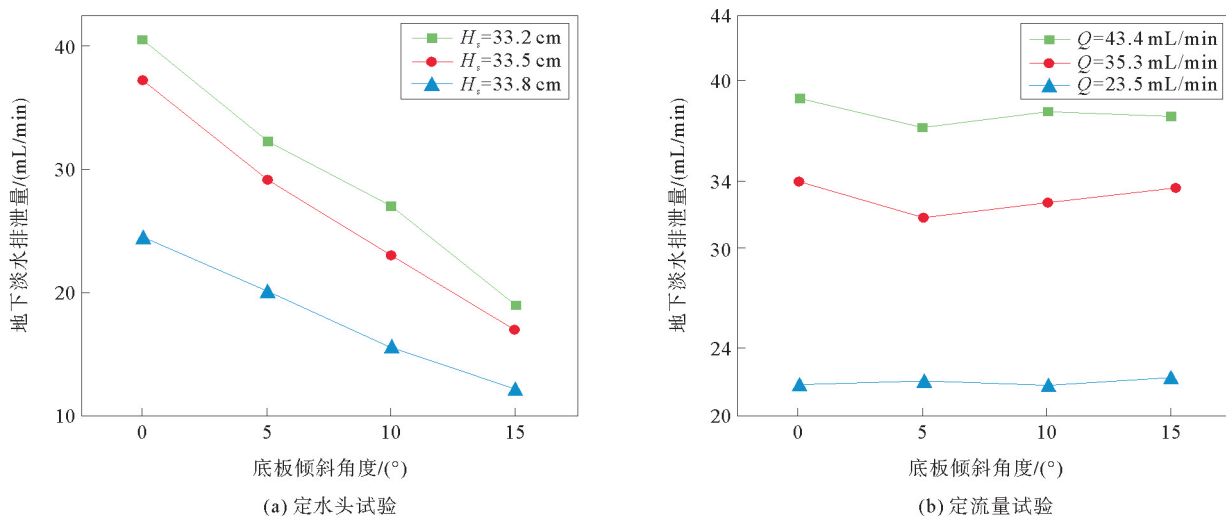


图 5 地下淡水排泄量随底板倾斜角度变化的折线图

Fig. 5 Line plot of subterranean freshwater discharge as a function of bottom slope angle

2.3 海平面高度、淡水流量和含水层岩性变化对海水入侵的影响

图 6 显示了在改变海平面高度和地下淡水流量情况下咸水楔长度的变化情况。由图 6(a)可知,当含水层底板倾斜角度为 5°时,海平面升高 0.3 cm,导致咸水楔长度增加了 49.6%;当底板倾斜角度增至 10°时,海平面同样升高 0.3 cm,导致咸水楔长度增加 43.8%;而在底板倾斜角度为 15°时,咸水楔长度的增加降至 39.8%。由图 6(b)可以看出,当地下淡水流量由 43.4 mL/min 减至 23.5 mL/min 时,在水平含水层中咸水楔的长度从 40.2 cm 增至 69.1 cm,增长率为 71.9%;而在底板倾斜角度为 15°的含水层中,相同的地下淡水流量变化导致咸水楔长度的增长率仅为 32.0%。上述结果表明,在不同倾斜角度(0°到 15°)的承压含水层中,倾斜角度越小,海平面升高或地下淡水流量减少对咸水楔长度的影响越显著,这与 Mazi 等^[20]通过解析得出的结果一致,即倾斜角度和边界条件的变化对海水入侵的程度有直接影响。

水平含水层中,海水入侵对于边界条件变化的敏感性更高,尤其在咸水楔面积方面表现更为明显。例如,地下淡水流量的减少在水平含水层中导致咸水楔面积增加的幅度更大。由表 1 可知,在水平承压含水层中,当地下淡水流量由 43.4 mL/min 减至 23.5 mL/min 时,咸水楔面积增加了 40.6%;而在底板倾斜角度为 15°的含水层中,当地下淡水流量减少相同的幅度时,咸水楔的面积仅增加了 22.5%。图 7、图 8 分别是倾

斜含水层中,在不同海平面高度、地下淡水流量条件下,咸淡水界面的分布图。

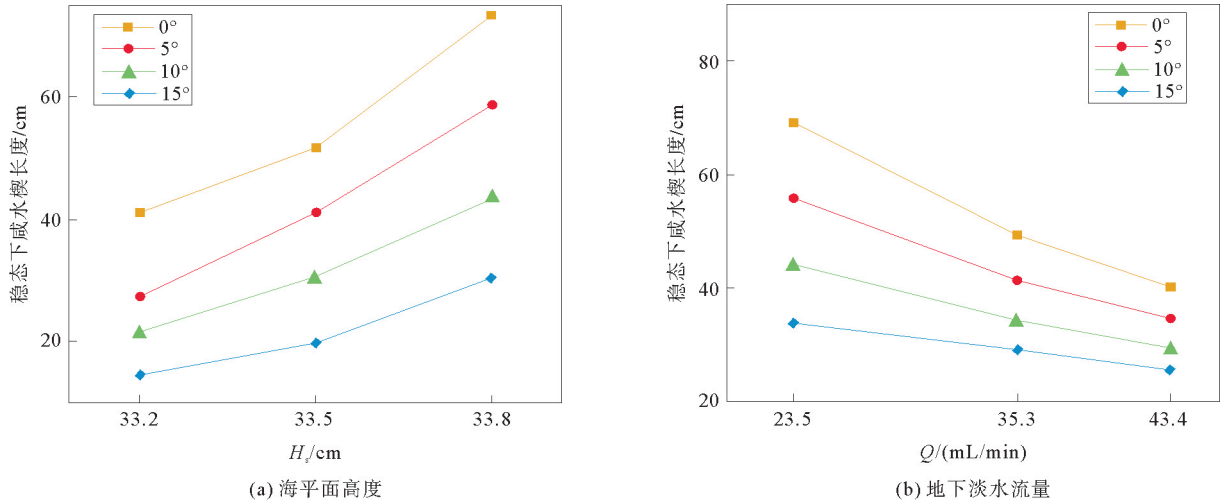


图6 边界条件变化对咸水楔长度的影响

Fig. 6 Influence of boundary condition variation on the length of wedge in saline water

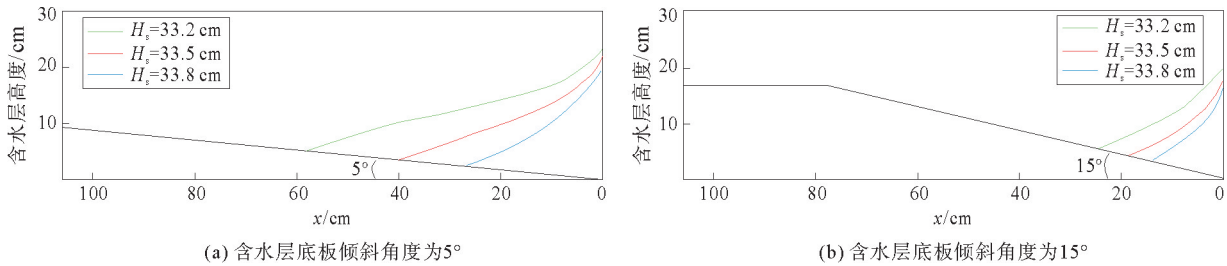


图7 不同海平面高度的倾斜含水层咸淡水界面分布图

Fig. 7 Distribution of salt-fresh water interface at different sea level heights in inclined aquifers

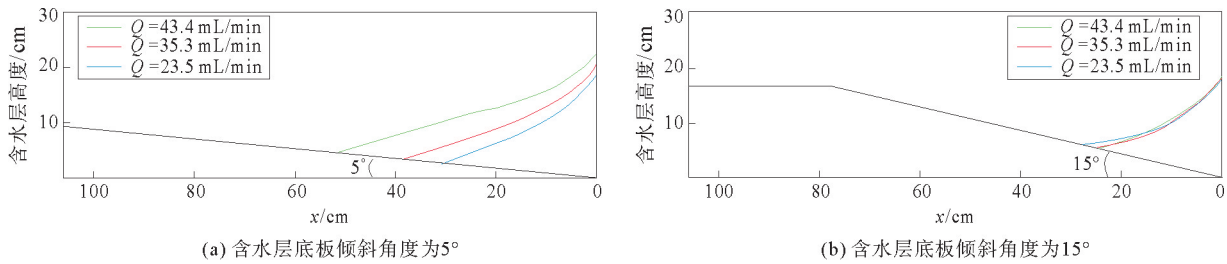


图8 不同地下淡水流量时倾斜含水层咸淡水界面分布图

Fig. 8 Distribution of the salt-fresh water interface of different underground freshwater discharges in inclined aquifers

由图7可知,当底板倾斜角度为 5° 、海平面从33.2 cm升高至33.8 cm时,咸淡水界面从明显的下凹抛物线变为较为平缓的直线形状。而在底板倾斜角度为 15° 的含水层中,海平面上升相同的高度时,咸淡水界面的下凹形状变化较小。由图8可知,当地下淡水流量依次减少11.8、19.9 mL/min时,在倾斜角度为 5° 的含水层中,咸淡水界面的下凹程度随地下淡水流量的减少而减弱;而在倾斜角度为 15° 的含水层中,咸淡水界面的形状基本不变。表明咸淡水界面对地下淡水流量的敏感性较低,并且含水层底板倾斜角度越小,海平面高度或地下淡水流量的变化对咸淡水界面分布的影响越明显。

图9显示了倾斜承压含水层岩性对咸水楔长度的影响。由图9可知,当含水层的岩性由粗砂变为细砂时,其渗透系数降低,咸水楔的长度也随之减少。相较于定水头条件,在定流量条件下咸水楔长度减少幅度更显著。以底板倾斜角度为 5° 的含水层为例,当含水层岩性由粗砂变为细砂时,在定水头条件下,咸水楔长

度从 58.8 cm 减少至 56.0 cm(图 9(a)),减少了 4.8%;而在定流量条件下咸水楔长度从 55.8 cm 减少至 30.3 cm(图 9(b)),减少了 45.7%,说明含水层岩性变化对咸水楔长度的影响更显著。研究发现,含水层底板倾斜角度越小,岩性改变对咸水楔长度的影响越大。例如,水平含水层中,当含水层岩性由粗砂变为细砂时,在定流量条件下,咸水楔长度的减少幅度达 51.2%;相比之下,当底板倾斜角度为 15°时,咸水楔长度的减少幅度仅为 29.4%。因此,在水平含水层中,海水入侵对岩性变化的响应程度更为敏感(图 9(b))。

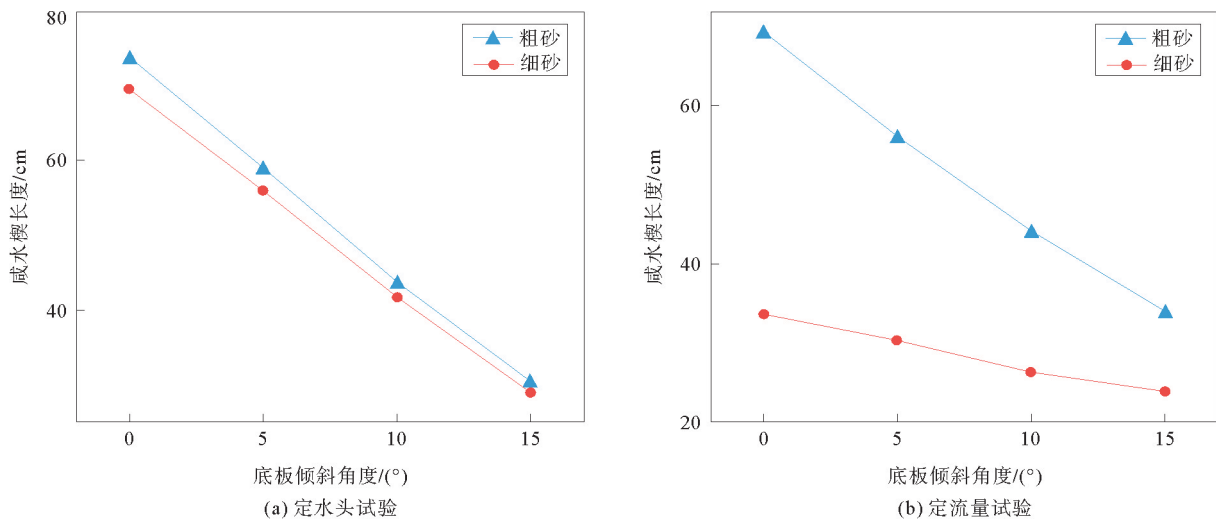


图 9 含水层岩性对咸水楔长度的影响

Fig. 9 Influence of changes in aquifer lithology on the length of the saltwater wedge

3 结论

本研究利用室内砂箱模型,模拟了不同底板倾斜角度下承压含水层海水入侵的动态和稳态特征,探究了海平面高度、地下淡水流量对向海倾斜承压含水层海水入侵的影响,得到如下结论:

1) 底板倾斜角度对承压含水层的海水入侵有显著影响。咸淡水界面稳定时,底板倾斜角度与咸水楔长度之间存在指数关系。随着底板倾斜角度的增大,咸水楔长度减少,咸淡水界面的下凹程度增加。

2) 在定水头条件下,地下淡水排泄量随底板倾斜角度的增大而线性减少。在定流量边界条件下,底板倾斜角度的变化对地下淡水排泄量的影响较小。但在两种边界条件下,咸水楔面积均随底板倾斜角度的增大而减少。当含水层岩性由粗砂变为细砂时,由于其渗透系数减小,咸水楔长度会缩短,尤其是在定流量条件下,其缩短更为显著。

3) 对于向海倾斜的承压含水层,底板倾斜角度越小,海平面升高、地下淡水流量减少以及含水层岩性变化对海水入侵的影响程度越大。相较于倾斜承压含水层,水平含水层中海水入侵对地下淡水流量变化的响应更为敏感。

参考文献:

- [1] TANG Y N, YAN M, WANG X X, et al. Experimental and modeling investigation of pumping from a fresh groundwater lens in an idealized strip island[J/OL]. Journal of Hydrology, 2021, 602. DOI:10.1016/j.jhydrol.2021.126734.
- [2] ABD-ELHAMID H, ABDELATY I, SHERIF M. Evaluation of potential impact of Grand Ethiopian Renaissance Dam on seawater intrusion in the Nile Delta Aquifer[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2019, 16: 2321-2332.
- [3] LU C H, CAO H F, MA J, et al. A proof-of-concept study of using a less permeable slice along the shoreline to increase fresh groundwater storage of oceanic islands: Analytical and experimental validation[J]. Water Resources Research, 2019, 55(8): 6450-6463.

- [4] CHANG Q P,ZHENG T Y,ZHENG X L, et al. Effect of subsurface dams on saltwater intrusion and fresh groundwater discharge[J]. *Journal of Hydrology*,2019,576:508-519.
- [5] OUDE ESSINK G H P,VAN BAAREN E S,DE LOUW P G B. Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands[J/OL]. *Water Resources Research*,2010,46(10). DOI:10.1029/2009WR008719.
- [6] POST V E A,GALVIS S C,SINCLAIR P J, et al. Evaluation of management scenarios for potable water supply using script-based numerical groundwater models of a freshwater lens[J]. *Journal of Hydrology*,2019,571:843-855.
- [7] ABD-ELATY I,KUSHWAHA N L,GRISMER M E, et al. Cost-effective management measures for coastal aquifers affected by saltwater intrusion and climate change[J/OL]. *Science of the Total Environment*,2022,836. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.155656.
- [8] ABD-ELHAMID H F,ABDEL-AAL G M,FAHMY M, et al. Experimental and numerical study to investigate the impact of changing the boundary water levels on saltwater intrusion in coastal aquifers[J/OL]. *Water*,2022,14(4). DOI:10.3390/w14040631.
- [9] ABDOLHALIK A,AHMED A,ABDELGAWAD A, et al. The impact of a low-permeability upper layer on transient seawater intrusion in coastal aquifers[J/OL]. *Journal of Environmental Management*,2022,307(6). DOI:10.1016/j.jenvman.2022.114602.
- [10] 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.
- [11] KOUSSIS A D,MAZI K. Corrected interface flow model for seawater intrusion in confined aquifers: Relations to the dimensionless parameters of variable-density flow[J]. *Hydrogeology Journal*,2018,26(8):2547-2559.
- [12] DU Y,MA T,CHEN L Z, et al. Genesis of salinized groundwater in Quaternary aquifer system of coastal plain,Laizhou Bay,China:Geochemical evidences,especially from bromine stable isotope[J]. *Applied Geochemistry*,2015,59:155-165.
- [13] KOUSSIS A D,GEORGOPOULOU E,KOTRONAROU A, et al. Cost-efficient management of coastal aquifers via recharge with treated wastewater and desalination of brackish groundwater: Application to the Akrotiri basin and aquifer, Cyprus[J]. *Hydrological Sciences Journal*,2010,55(7):1234-1245.
- [14] LU C H,XIN P,KONG J, et al. Analytical solutions of seawater intrusion in sloping confined and unconfined coastal aquifers[J]. *Water Resources Research*,2016,52(9):6989-7004.
- [15] ABARCA E,CARRERA J,SÁNCHEZ-VILA X, et al. Quasi-horizontal circulation cells in 3D seawater intrusion[J]. *Journal of Hydrology*,2007,339(3/4):118-129.
- [16] 毕延凤,于洪军,徐兴永,等. 莱州湾南岸平原地下水化学特征研究[J]. *海洋通报*,2012,31(3):241-247.
BI Yanfeng,YU Hongjun,XU Xingyong, et al. Study on the groundwater hydrochemical characteristics in the southern Laizhou Bay[J]. *Marine Science Bulletin*,2012,31(3):241-247.
- [17] 韩汝杰,李静,李晓波. 莱州湾滨海平原沉积环境对古卤水盐分迁移能力的影响[J/OL]. *地质科技通报*. (2023-10-16)[2023-11-14]. <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230307>.
HAN Rujie,LI Jing,LI Xiaobo. Effect of sedimentary environment on salt migration ability of ancient brine in coastal plain of Laizhou Bay[J/OL]. *Bulletin of Geological Science and Technology*. (2023-10-16)[2023-11-14]. <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230307>.
- [18] 高宗军. 地下水流系统分异的试验演示及其意义[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*,2013,32(2):17-24.
GAO Zongjun. Experimental demonstration and significance of groundwater flow system differentiation[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*,2013,32(2):17-24.
- [19] 王宗志,王宇,王坤,等. 基于数值模拟的滨海含水层咸淡水运移对地下水库建设与开采的响应规律研究[J/OL]. *水资源保护*. (2022-11-14)[2023-11-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20221111.1123.004.html>.
WANG Zongzhi,WANG Yu,WANG Kun, et al. Study on the response law of freshwater-saltwater migration in coastal aquifer to underground reservoir construction and extraction based on numerical simulation[J/OL]. *Water Resources Protection*. (2022-11-14)[2023-11-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20221111.1123.004.html>.
- [20] MAZI K,KOUSSIS A D,DESTOUNT G. Tipping points for seawater intrusion in coastal aquifers under rising sea level[J/OL]. *Environmental Research Letters*,2013,8(1). DOI:10.1088/1748-9326/8/1/014001.

(责任编辑:高丽华)