

# 露头处具有淤泥层的滨海含水层系统中 海潮引起的水头波动

李海龙<sup>1,2</sup>, 任亚坤<sup>1</sup>, 李国徽<sup>2</sup>, 郭巧娜<sup>2</sup>

1. 鞍山师范学院数学系, 辽宁鞍山 114007

2. 中国地质大学环境学院及生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 滨海地区社会与经济的发展引发了各种各样的水文地质问题, 因此对滨海地区的水文地质条件, 尤其是地下水与海水之间的水力联系的研究尤为重要. 本文考察了海底露头处具有淤泥层的滨海含水层系统中由海潮引起的水头波动. 该系统由潜水含水层、承压含水层和介于其间的弱透水层构成. 建立了该系统的数学模型, 得到了该模型的解析解. 该解析解包含2个无量纲参数: 弱透水层的相对越流系数和淤泥层的相对透水系数. 解析解表明, 淤泥层使各处的水头波幅被缩小了一个常数倍(波幅缩减因子), 并使各处的波动相位产生了一个不超过 $45^\circ$ 的正位移常数(时滞). 该时滞对半日潮不超过1.5 h, 对全日潮不超过3 h. 波幅缩减因子和正位移常数只与弱透水层的相对越流系数和淤泥层的相对透水系数有关. 当这两个无量纲参数取某些特殊值时, 本次研究的解和前人考虑的几种较简单情形所对应的解一致. 承压含水层中水头波幅随着淤泥层的相对透水系数的递增而严格递增, 随弱透水层的相对越流系数的递增而严格递减; 波动相位随着这两个无量纲参数的递增均严格递减. 分析表明弱透水层的越流和淤泥层的存在均对承压含水层水头波动有显著影响.

**关键词:** 海潮; 滨海含水层系统; 淤泥层边界; 海底露头; 越流; 解析解; 淤泥层透水系数.

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2008)02-0273-06

收稿日期: 2007-04-11

## Tidal Fluctuation in a Coastal Aquifer System with a Suboutcrop Covered by a Silt Layer

LI Hai-long<sup>1,2</sup>, REN Ya-kun<sup>1</sup>, LI Guo-hui<sup>2</sup>, GUO Qiao-na<sup>2</sup>

1. Department of Mathematics, Anshan Normal University, Anshan 114007, China

2. School of Environmental Studies & (MOE) Biogeology and Environmental Geology Lab, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** With the social and economic development in coastal areas a variety of hydrogeological problems arise. In order to solve these problems it is necessary to study hydraulic relation between groundwater and seawater. This paper explores the tide-induced groundwater head fluctuation in a coastal multi-layered aquifer system with a suboutcrop covered by a silt layer. The system consists of an unconfined aquifer, a leaky confined aquifer and a semi-permeable layer in the middle. The mathematical model for describing the system is built and the analytical solution to the model is derived. The analytical solution contains two dimensionless parameters: the leakances of the semi-permeable layer and the silt-layer, respectively. The silt layer reduces the amplitude of the hydraulic head fluctuation by a constant factor, and increases the phase by a positive shift (time-lag), both of which depend on the leakances of the silt layer and the semi-permeable layer. The time lag does not exceed 1.5 h and 3.0 h for semidiurnal and diurnal sea tides respectively. When the leakance of the semi-permeable layer or the silt layer assumes certain special values the solutions are in accordance with the ones derived by several previous researchers. The amplitude of the hydraulic head fluctuation in the confined aquifer increases with the leakance of the silt-layer and decreases with the leakance of the semi-permeable layer; while the phase shift of fluctuation decreases with both of

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 40372111).

作者简介: 李海龙(1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事地下水、气流数学模拟、生态数学及应用微分方程的研究工作.

E-mail: hailong@graduate.hku.hk

them. The solution analysis indicates that both the silt layer and the leakage of the semi-permeable layer influence significantly the hydraulic head fluctuation in the confined aquifer.

**Key words:** tide; coastal aquifer system; silt-layer boundary; submarine outcrop; leakage; analytical solution; leakage of the silt layer.

滨海地区社会与经济的发展引发了各种各样的水文地质问题,如地下水资源枯竭、泉水消失、海水(咸水)入侵、地面沉降、地面(岩溶)塌陷、土地沙漠化、地下水污染造成的水质恶化,甚至引起生态环境的退化等(Carr and Van der Kamp, 1969; Akpofure *et al.*, 1984; Farrell, 1994; Svitil, 1996; Delwyn *et al.*, 1998; 李海龙和焦赳赳, 2003). 为了解决这些问题,就需要对滨海地区的水文地质条件进行研究,尤其对地下水与海水之间的水力联系的研究尤为重要. 滨海地区含水层中的水头或水位会随着海潮波动. 自 20 世纪 50 年代以来,许多学者对该问题进行了解析或数值模拟研究,例如, Jacob (1950)和 Carr and van der Kamp (1969)给出了临海单一承压含水层中水头随海潮波动的解析解; Van der Kamp (1972)考虑了一端在海底无限延伸,另一端向陆地方向无限延伸的含水层; Li and Chen (1991a)考虑了含水层的海底延伸长度为有限的情形; 李国敏和陈崇希 (1991b)进一步考虑了含水层的离岸区顶板有越流的情形; Sun (1997)考虑了单一含水层具有二维边界条件的情形; Jiao and Tang (1999)讨论了一个由上层潜水含水层、下层承压含水层和夹于其间的弱透水层组成的滨海含水层系统,他们忽略了弱透水层的弹性贮水; 在此基础上, Li and Jiao (2001b)又进一步考虑了弱透水层的弹性贮水. 根据海潮效应的解析解, Li *et al.* (2002)估计了香港某临海区域填海造田形成的一个 L 形的深层潜水含水层的扩散率. Merritt (2004) 则用不同的解析方法,估计了佛罗里达州含水层系统的水硬度. 所有的这些研究都为解决滨海地区的环境、经济、生态和工程问题提供了理论指导和技术支持. 事实上,在潮间带以下较深处,由于波浪微弱,细粒粉砂、粘土以及有机质碎屑等在缺氧环境中会逐渐形成海底淤泥,大部分天然含水层在海底露头处都被海底淤泥所覆盖,而不与海水直接接触(李国敏和陈崇希, 1991b). 而海底露头处的边界条件在滨海含水层模型和地下水的研究中是一个关键的边界条件,对滨海地下水动态有重要的影响. 基于这样的考虑,本文在 Jiao and Tang (1999) 的研究基础

上,考察了一个滨海多层含水层系统,它包括上层潜水含水层,下层承压含水层及夹于其间的弱透水层,各层向陆地方向无限延伸,在海陆交界处有垂直边界,下层含水层在海底露头处与海水之间存在一层相对较薄的淤泥层. 本文建立了描述该系统的数学模型,得到了该模型的解析解,并将此解与前人所考察的几种情况所对应的解析解作了对比. 最后讨论分析了淤泥层的透水性及弱透水层的越流对承压含水层中水头波动的影响.

## 1 数学模型的建立和求解

图 1 给出了所考察的滨海含水层系统在垂直于海岸线方向上的横断面,下层含水层的海底露头处有一层相对较薄的淤泥层. 假设: ①承压含水层均质、等厚、各向同性,向陆地方向无限延伸; ②忽略海水与淡水的区别; ③承压含水层中水流为水平一维流,方向垂直于海岸线,且服从达西定律; ④忽略弱透水层的弹性贮水,弱透水层只有垂向越流; ⑤和承压含水层相比,潜水含水层具有较大的给水度,能有效地减缓海潮的影响,从而忽略潜水含水层中的水位波动. 上述假设①、②、③沿用了 Li and Chen (1991a) 以及李国敏和陈崇希 (1991b) 中所用的概

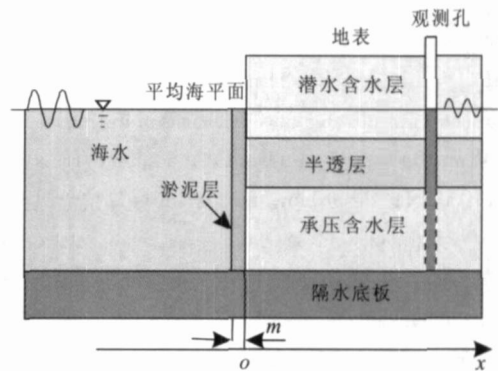


图 1 露头处具有淤泥层的滨海含水层系统在垂直于海岸线方向上的横断面示意图

Fig. 1 Schematic of the cross-intersection perpendicular to the coastline of a coastal aquifer system with a suboutcrop covered by a silt layer

念模型, 假设④最早由 Hantush (1960) 提出并应用于井流问题, Jiao and Tang (1999) 将其应用于临海含水层中海潮引起的周期地下水流, 假设⑤的合理性参见 Jiao and Tang (1999) 和 Li and Jiao (2001a), 有关其适用范围的讨论参见 Li and Jiao (2002)。

在此需要说明的是, 所考察的淤泥层, 既可以像图 1 中那样, 存在于各层的露头处, 也可以只存在于下部承压含水层的露头处。这种变化不会对数学模型产生影响。事实上, 上层潜水含水层露头处淤泥层的存在, 会减弱海潮对潜水含水层水位的影响, 从而使得上述的假设⑤更为合理。而中间弱透水层露头处淤泥层的存在与否, 对弱透水层中的垂向越流的大小没有影响。

设  $x$  轴垂直于海岸线, 正向指向陆地, 且与海岸线交点为坐标原点 (图 1)。取平均海平面为基准面。根据上述假设及 Hantush (1960) 中的有关理论, 承压含水层中的水头所满足的方程为:

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = T \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - L_s h, \quad -\infty < t < +\infty, \quad x \geq 0. \quad (1)$$

其中:  $h(x, t)$  是承压含水层的水头 [L],  $t$  是时间,  $S$  和  $T$  分别是承压含水层的贮水系数 (无量纲) 和导水系数 [L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>],  $L_s$  是通过的弱透水层的越流 [T<sup>-1</sup>], 其定义如下:

$$L_s = K_1 \backslash b_1 \quad (2)$$

其中:  $b_1$  和  $K_1$  分别是弱透水层的厚度 [L] 及垂直水力传导系数 [LT<sup>-1</sup>]. 在含水层中内陆方向上无穷远处水力净补给为零, 因此有:

$$\frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = 0. \quad (3)$$

此外, 在海岸线  $x=0$  处, 淤泥层将承压含水层与海水隔开, 淤泥层两侧的水头差为  $(h_s - h)$ , 其中:

$$h_s(t) = A \cos(\omega t) \quad (4a)$$

$h_s(t)$  是海水水头 [L],  $A$  是海潮波动的波幅 [L],  $\omega=2\pi/t_0$  是角频率 [T<sup>-1</sup>],  $t_0$  是海潮周期 [T]。

下面来考察淤泥层处的边界条件。忽略淤泥层内贮水量的变化, 根据交界面上流量连续性: 从承压含水层流入淤泥层的水量等于从淤泥层流入海中的水量。因此根据 Darcy 定律有:

$$K \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{x=0} = K' \frac{h_s(t) - h(x, t)}{m} \Big|_{x=0}, \quad (4b)$$

其中:  $K'$ 、 $m$  和  $K$  分别是淤泥层的水力传导系数 [LT<sup>-1</sup>], 厚度 [L] 和承压含水层的水力传导系数

[LT<sup>-1</sup>].  $n$  是含水层左边界的法线方向, 与  $x$  轴方向相反。上式可改写成:

$$-\frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=0} + \mu h(x, t) \Big|_{x=0} = \mu h_s \quad (5)$$

式中引入的参数  $\mu$  是淤泥层的相对透水系数 [L<sup>-1</sup>], 它描述了淤泥层相对于承压含水层的透水性, 其定义如下:

$$\mu = \frac{K'}{mK}. \quad (6)$$

经推导 (具体过程简化), 方程 (1) 和边界条件 (3)、(5) 的解为:

$$h(x, t) = AC_{\text{sit}} e^{-\mu x} \cos(\omega t - aqx - \varphi_{\text{sit}}), \quad (7)$$

其中  $a$  是承压含水层的海潮传导系数 [L<sup>-1</sup>]:

$$a = \sqrt{\omega S / 2T} = \sqrt{\pi S / T t_0}; \quad (8a)$$

$\sigma$  是淤泥层的无量纲相对透水系数, 其定义如下:

$$\sigma = \mu / a; \quad (8b)$$

$u$  是通过弱透水层的无量纲相对越流系数:

$$u = L_s / \omega S; \quad (8c)$$

$p$  和  $q$  由无量纲相对越流系数  $u$  确定, 其定义如下:

$$p = \sqrt{\sqrt{1+u^2}+u}, \quad q = \sqrt{\sqrt{1+u^2}-u} \quad (8d)$$

$C_{\text{sit}}$  是由淤泥层引起的波幅缩减因子 (无量纲), 它只与  $u, \sigma$  有关, 其定义如下:

$$C_{\text{sit}}(u, \sigma) = \frac{\sigma}{\sqrt{(p+\sigma)^2+q^2}}. \quad (8e)$$

$\varphi_{\text{sit}}$  是由淤泥层引起的相位移常数, 只与  $u, \sigma$  有关, 其定义如下:

$$\varphi_{\text{sit}}(u, \sigma) = \arctan(q/(\sigma+p)). \quad (8f)$$

## 2 解的讨论

从式 (7), (8a) ~ (8f) 中可以看出, 解中有两个独立的参数, 即淤泥层的无量纲相对透水系数和弱透水层的无量纲相对越流系数。下面讨论当  $u$  和  $\sigma$  分别取某些特殊值时, 本研究的解和前人的解之间的关系。

### 2.1 无越流有淤泥层的情形

当所考虑的承压含水层无越流, 即中间层的水力传导系数  $K_1=0$  时, 由 (2) 式和 (8c) 式得  $u=0$ , 将其代入 (8d) ~ (8f) 式, 得到:

$$p \Big|_{u=0} = 1, \quad q \Big|_{u=0} = 1. \quad (9a)$$

从而,

$$C_{\text{sit}}(u, \sigma) \Big|_{u=0} = \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2+2\sigma+2}}$$

$$\varphi_{\text{silt}}(u, \sigma) \Big|_{u=0} = \arctan\left(\frac{1}{(\sigma+1)}\right) \quad (9b)$$

这时(7)式被简化为:

$$h(x, t) = Ae^{-apx} \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + 2\sigma + 2}} \cos(\omega t - ax - \arctan\frac{1}{\sigma+1}). \quad (10)$$

这与 Li *et al.* (2007)中所得到的解一致.

## 2.2 有越流无淤泥层的情形

无淤泥层相当于淤泥层的厚度  $m \rightarrow 0$ , 由(6)式和(8b)式知, 这时淤泥层相对透水系数  $\sigma \rightarrow +\infty$ . 将其代入(8e)~(8f)式, 得到:

$$C_{\text{silt}} \Big|_{\sigma \rightarrow +\infty} = 1, \quad \varphi_{\text{silt}} \Big|_{\sigma \rightarrow +\infty} = 0. \quad (11)$$

这时解(7)式可被简化为:

$$h(x, t) = Ae^{-apx} \cos(\omega t - aqx). \quad (12)$$

这与 Jiao and Tang (1999)中的解(参见他们文章中 748 页(4)式, 他们取隔水底板为基准面, 而本文取平均海平面为基准面)一致.

这时若中间层的水力传导系数  $K_1 \rightarrow 0$ , 则由(2)式和(8c)式可知弱透水层的相对越流系数  $u = 0$ . 故(9a)式成立. 由于无淤泥层, 此时还成立(11)式. 将(9a)和(11)式代入(7)式得到:

$$h(x, t) = Ae^{-ax} \cos(\omega t - ax),$$

这与 Jacob (1950)的解一致.

## 3 越流及淤泥层对承压含水层中水头波动的影响

为了讨论越流及淤泥层对承压含水层中水头波动的影响情况, 首先必须搞清水头波动的解析解(7)式中所包含的参数的取值范围. 根据 Li and Jiao (2001b)一文, 实际含水层系统在半日潮情况下,  $u$  的变化范围为 0 到 10, 而在全日潮情况下, 由(8c)式,  $u$  的变化范围为 0 到 20. 因此在本文的讨论中,  $u$  的变化范围取为 0 到 20. 理论上来说, 淤泥层相对透水系数  $\sigma \geq 0$  且可以任意大. 在讨论中, 为了清楚和方便, 用  $\lg\sigma$  作为自变量代替  $\sigma$ , 并将其取值范围选得尽量大, 使得在该取值范围之外, 水头波动不随  $\lg\sigma$  发生变化.

解析解(7)式和 Jiao and Tang (1999)的解(12)式相比, 只多了一个波幅缩减因子  $C_{\text{silt}}(u, \sigma)$  和相位移常数  $\varphi_{\text{silt}}(u, \sigma)$ , 其他完全一致. 因此, 若讨论清楚

$C_{\text{silt}}$ 、 $\varphi_{\text{silt}}$  随  $u, \sigma$  变化的情况, 就等于讨论清楚了承压含水层中水头的波幅与相位随  $u, \sigma$  变化的情况. 下面我们来讨论  $C_{\text{silt}}$ 、 $\varphi_{\text{silt}}$  随  $u, \sigma$  变化的情况.

图 2a 和 2b 分别描述的是波幅缩减因子  $C_{\text{silt}}$  和相位移常数  $\varphi_{\text{silt}}$  在淤泥层相对透水系数  $\sigma$  和弱透水层相对越流系数  $u$  取不同值时的变化情况. 图 2a 说明波幅缩减因子变化范围为  $[0, 1]$ , 它随  $\sigma$  的递增而严格递增, 随  $u$  的递增而严格递减. 事实上, 淤泥层的透水性是通过其相对透水系数  $\sigma$  表征的, 当淤泥层的透水性很好时(即淤泥层厚度很薄或其水力传导系数较大时), 根据(8b)和(6)式, 其相对透水系数  $\sigma$  很大, 这时淤泥层对海潮传播的阻力必然很小, 从而波幅衰减系数就越大.

淤泥层的存在, 会使得弱透水层的相对越流系数  $u$  通过双重因素来减小含水层水头的波动幅度, 一方面通过减小波幅缩减因子  $C_{\text{silt}}$ (图 2a), 另一方面通过增大系数  $p$ , 从而减小式(7)中的指数项  $\exp[-ap(u)x]$  来减小含水层水头的波动幅度. 后者在 Jiao and Tang (1999, 2001)以及 Volker and Zhang (2001)中有详细的讨论, 这里不赘.

图 2b 说明相位移常数  $\varphi_{\text{silt}}$  是  $\sigma$  和  $u$  的严格减函数, 其取值范围为  $[0, \pi/4]$ , 其最大值所对应的时滞为  $\pi/(4\omega)$ . 该时滞的最大值对于半日潮约为 1.5 h, 对于全日潮约为 3 h. 当淤泥层相对透水系数  $\sigma$  或弱透水层的相对越流系数  $u$  较大时, 相位移常数  $\varphi_{\text{silt}}$  就变得很小. 图 2 同时说明淤泥层相对透水系数  $\sigma$  的有效作用范围是  $-2 < \lg\sigma < 3$ , 即  $0.01 < \sigma < 1000$ . 在该范围之外,  $\sigma$  不再对波幅缩减因子  $C_{\text{silt}}$  和相位移常数  $\varphi_{\text{silt}}$  有影响, 从而也不再对含水层水头波动有影响.

为了更直观地考察弱透水层的无量纲相对越流系数  $u$  和淤泥层的无量纲相对透水系数  $\sigma$  对含水层水头波动的影响, 根据解析解(7)式定义并考察承压含水层的无量纲水头

$$h(x, t)/A = C_{\text{silt}} e^{-apx} \cos(\omega t - aqx - \varphi_{\text{silt}}).$$

图 3 是在内陆区位置  $ax = 0.3$  处, 无量纲水头随无量纲时间  $\omega t$  的变化情况. 在图 3a 中, 弱透水层相对越流系数固定为  $u = 0.1$ , 淤泥层的相对透水系数  $\sigma$  取不同值. 在图 3b 中, 淤泥层相对透水系数固定为  $\sigma = 1.0$ , 弱透水层相对越流系数  $u$  取不同的值. 图 3 更直接地说明承压含水层的水头波动幅度随着弱透水层的相对越流系数  $u$  的增加而递减, 随着淤泥层的相对透水系数  $\sigma$  的增大而递增; 另一方

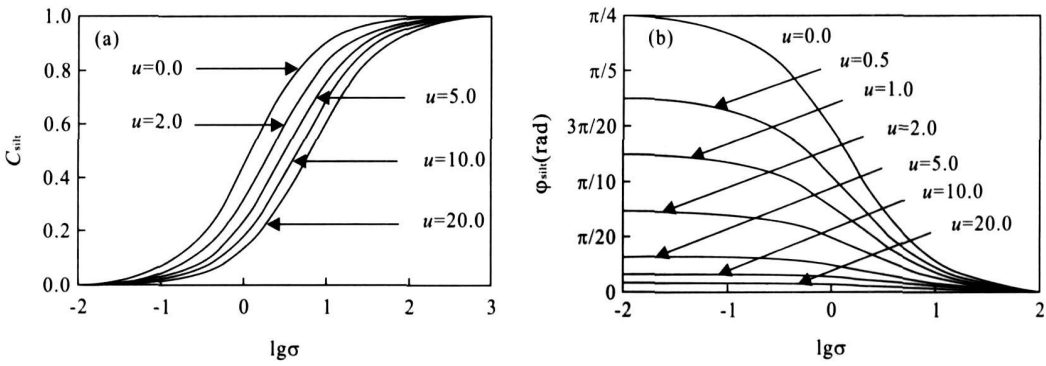


图 2 波幅缩减因子  $C_{silt}$  和相位移  $\varphi_{silt}$  分别随着淤泥层的相对透水系数  $\sigma$  在弱透水层的相对越流系数  $u$  取不同值时的变化  
 Fig. 2 Changes of both the amplitude reducing factor  $C_{silt}$  and phase shift  $\varphi_{silt}$  with the dimensionless leakance  $\sigma$  of the silt layer for different values of the dimensionless leakance  $u$  of the semi-permeable layer

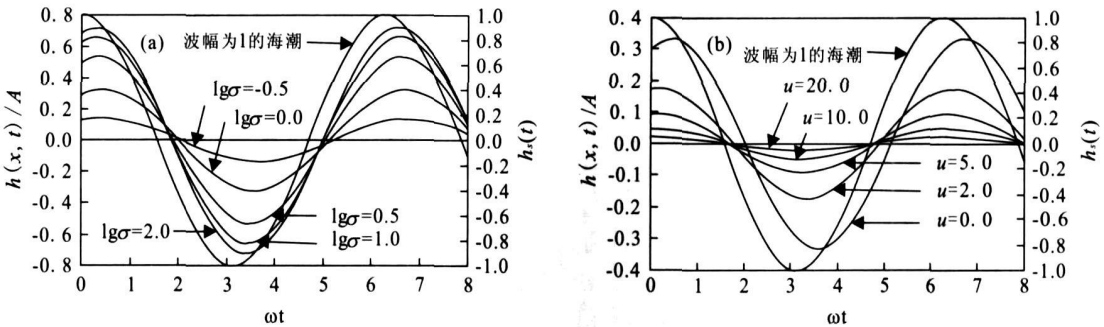


图 3 无量纲水头  $h(x,t)/A$  在  $ax=0.3$  处随无量纲时间  $\omega t$  的变化情况

Fig. 3 Changes of the dimensionless groundwater-head  $h(x,t)/A$  with the dimensionless time  $\omega t$  at inland location  
 a. 弱透水层的相对越流系数固定为  $u=0.1$ , 淤泥层相对透水系数  $\sigma$  取不同值, b. 淤泥层相对透水系数固定为  $\sigma=1.0$ , 弱透水层相对越流系数  $u$  取不同值. 海潮波动的刻度为右坐标轴

面承压含水层的水头波动的相位移随着弱透水层的相对越流系数  $u$  的增加而递减(显著), 随着淤泥层的相对透水系数  $\sigma$  的增大而递增(但不显著)。

已有的研究表明, 海潮引起的承压含水层水头波动迅速衰减的原因一方面可归结为承压含水层所具有的较大的海潮传播系数  $a$  (式(8a)), 小的导水系数或大的弹性贮水系数均可导致大的海潮传播系数(这方面的研究例如有: Ferris, 1951; Gregg, 1966; White and Roberts, 1994); 另一方面可归结为和承压含水层相邻的弱透水层的越流(如 Jiao and Tang, 1999; Li and Jiao, 2001b, 2002; Jeng *et al.*, 2002)。而本文的讨论表明, 含水层海底露头处若存在透水性较差的淤泥层时, 仍然可以使水头波动幅度显著减小, 并产生较大的相位移(时滞)。

### 4 结论

本文考察了一个滨海多层含水层系统, 它由上层潜水含水层、下层承压含水层和夹于其间的弱透水层构成, 各层都在海岸线处终止, 并向陆地方向无限延伸。且下层承压含水层的海底露头处被一淤泥层覆盖。建立了描述该系统的数学模型, 得到了该模型的解析解。解析解表明, 弱透水层的越流和淤泥层的存在减小了含水层中水头波动的幅度, 增大了相位移(时滞)。淤泥层使各处的水头波幅被缩小了一个常数倍(波幅缩减因子), 并使各处的波动相位产生了正位移常数(时滞)。波幅缩减因子和正位移常数只与弱透水层的相对越流系数  $u$  和淤泥层的相对透水系数  $\sigma$  有关。波幅缩减因子变化范围为  $[0, 1]$ , 它随  $\sigma$  的递增而严格递增, 随  $u$  的递增而严格递减。正位移常数变化范围为  $[0, \pi/4]$ , 其最大值所对应的时滞对于半日潮约为 1.5 h, 对于全日潮来说则约为

3 h. 相位移常数随  $\sigma$  和  $u$  的递增而严格递减. 当  $u$  或  $\sigma$  取某些特殊值时, 解析解和前人考虑的几种较简单情形所对应的解一致. 分析同时表明弱透水层的越流和淤泥层的存在均对承压含水层水头波动有显著影响.

致谢: 该项研究得到国家自然科学基金面上项目 (No. 40372111) 资助.

## References

- Akpofo, E. T., James A. L., Alexander, H. D. C., 1984. Boundary integral solution to seawater intrusion into coastal aquifers. *Water Resour. Res.*, 20(8): 1150–1158.
- Carr, P. A., van der Kamp, G., 1969. Determining aquifer characteristics by the tidal methods. *Water Resour. Res.*, 5(5): 1023–1031.
- Delwyn, S. O., William, R. S., Edward, L. B., et al., 1998. Numerical analysis of the hydrogeologic controls in a layered coastal aquifer system, Oahu, Hawaii, USA. *Hydrogeology Journal*, 6: 243–263.
- Farnell, E. R., 1994. Analysis of groundwater flow through leaky marine retaining structures. *Geotechnique*, 44(2): 255–263.
- Ferris, J. G., 1951. Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility. *Int. Assoc. Scient. Hydrol. Publ.*, 33: 148–155.
- Gregg, D. O., 1966. An analysis of ground-water fluctuations caused by ocean tides in Glynn County, Georgia. *Ground Water*, 4(3): 24–32.
- Hantush, M. S., 1960. Modification of the theory of leaky aquifers. *J. Geophys. Res.*, 65: 3713–3716.
- Jacob, C. E., 1950. Flow of groundwater. In: Rouse, H., ed., *Engineering hydraulics*. John Wiley, New York, 321–386.
- Jeng, D. S., Li, L., Barry, D. A., 2002. Analytical solution for tidal propagation in a coupled semi-confined/phreatic coastal aquifer. *Advances in Water Resources*, 25(5): 586–588.
- Jiao, J. J., Tang, Z. H., 2001. Reply to comment by R. E. Volker and Q. Zhang on “An analytical solution of groundwater response to tidal fluctuation in a leaky confined aquifer”. *Water Resour. Res.*, 37(1): 187–188.
- Jiao, J. J., Tang, Z. H., 1999. An analytical solution of groundwater response to tidal fluctuation in a leaky confined aquifer. *Water Resour. Res.*, 35(3): 747–751.
- Li, G. M., Chen, C. X., 1991a. Determining the length of confined aquifer roof extending under the sea by the tidal method. *J. Hydrol.*, 123: 97–104.
- Li, G. M., Chen, C. X., 1991b. The determination of the boundary of confined aquifer extending under the sea by analysis of groundwater level fluctuations. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 16(5): 581–589 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. L., Jiao, J. J., 2001a. Tide-induced groundwater fluctuation in a coastal leaky confined aquifer system extending under the sea. *Water Resour. Res.*, 37(5): 1165–1171.
- Li, H. L., Jiao, J. J., 2001b. Analytical studies of groundwater-head fluctuation in a coastal confined aquifer overlain by a leaky layer with storage. *Adv. Water Resour.*, 24(5): 565–573.
- Li, H. L., Jiao, J. J., 2002. Analytical solutions of tidal groundwater flow in coastal two-aquifer system. *Adv. Water Resour.*, 25(4): 417–426.
- Li, H. L., Jiao, J. J., 2003. Numerical simulation of tide-induced periodic air pressure fluctuations in coastal vadose zone. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(5): 505–510 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. L., Jiao, J. J., Lu, M., et al., 2002. Tide-induced groundwater level fluctuation in coastal aquifers bounded by L-shaped coastlines. *Water Resour. Res.*, 38(3), doi: 10.1029/2001WR00556.
- Li, H. L., Li, G. Y., Cheng, J. M., et al., 2007. Tide-induced head fluctuations in a confined aquifer with sediment covering its outlet at the sea floor. *Water Resour. Res.*, 43, doi: 10.1029/2005WR004724.
- Merritt, M. L., 2004. Estimating hydraulic properties of the Floridan aquifer system by analysis of earth-tide ocean-tide and barometric effects Collier and Henry Counties Florida. USGS/ Water-Resources Investigations Report 03–4267.
- Sun, H., 1997. A two-dimensional analytical solution of groundwater response to tidal loading in an estuary. *Water Resour. Res.*, 33(6): 1429–1435.
- Svitil, K. A., 1996. Groundwater secrets. *Discover.*, 17(9): 28.
- Van der Kamp, G., 1972. Tidal fluctuations in a confined aquifer extending under the sea. *Proc. Int. Geol. Congr.*, 24th, 11: 101–106.
- Volker, R. E., Zhang, Q., 2001. Comments on “An analytical solution of groundwater response to tidal fluctuation in a leaky confined aquifer” by Jiu Jimmy Jiao and Zhonghua Tang. *Water Resour. Res.*, 37(1): 185–186.
- White, J. K., Roberts, T. O. L., 1994. The significance of groundwater-tidal fluctuations. In: Wilkinson, W. B., ed., *Groundwater problems in urban areas*. Inst. of Civ. Eng., London, 31–42.

## 附中文参考文献

- 李国敏, 陈崇希, 1991b. 利用岸边水头动态确定含水层在临海方向上的边界. *地球科学——中国地质大学学报* 16(5): 581–589
- 李海龙, 焦赳赳, 2003. 海潮引起的滨海地区包气带气压周期性变化的数值模拟. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(5): 505–510.