

典型潜水含水层通过缓坡湖底的渗流量计算

李 勇^{1,2}, 王 超^{1,2,3}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 江苏 南京 210098;

2. 河海大学环境科学与工程学院 江苏 南京 210098;

3. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室 江苏 南京 210098)

摘要 根据浅水湖泊与周边含水层的水力关系,首先假设潜水含水层以同厚水平无限延伸,并与湖底以一个较小的坡度相交,然后利用水力学方法对含水层中地下水在湖底表面的水力坡降和渗流量分布进行了研究.结果表明,具有较缓坡度湖底的大型浅水湖泊,其含水层的渗流量主要集中在湖岸带(Dupuit 假设在这里不成立),并通过湖底与含水层接触面的上部进入湖泊,排水区的宽度与含水层厚度和湖底坡度的大小等密切相关.

关键词 浅水湖泊 潜水含水层 渗流量 水力坡降

中图分类号:P641

文献标识码:A

文章编号:1000-1980(2005)04-0366-04

湖泊流域长期的人口居住和农业土地的高强度开发利用导致了湖岸地下水中污染物浓度的增加,湖岸地下水向湖排泄对湖泊特别是其岸边水体环境产生了重要影响,其中氮和磷等营养物质的输入促使了岸边水环境的局部富营养化.一些研究者^[1~5]试图估算直接影响湖泊水量和水质的地下水入湖水量.虽然地下水流速度很小,但对大型湖泊来说,由于湖底面积较大,渗流量可能很大.Yoshiaki 等^[1]指出,在计算日本最大的湖泊——Biwa 湖的水量平衡时,地下水入湖量不可忽略.另外,湖周地下水中氮、磷的浓度可能较高.例如,我国太湖流域宜兴地区地下水中总氮和总磷的浓度分别达到 3.05 mg/L 和 0.181 3 mg/L,甚至高于同期河流总氮和总磷的浓度^[6].然而,人们在太湖、滇池等大型浅水湖泊水量平衡和营养物质源项计算时很少考虑地下水的贡献.

一般情况下,地下水向湖的排泄区(带)集中在湖泊沿岸的一条窄小区域部分^[1~4].国内外一些研究者^[1,5,7]应用保角变换等方法分析一些典型承压含水层入湖水量,并取得了许多重要成果.我国许多大型浅水湖泊湖底都是以较小坡度延伸到岸边的,靠近湖底处的水流垂向分量不能忽略,因而此时不能应用 Dupuit-Forchheimer 假设^[1,5].本文应用水力学方法分析一种典型的潜水含水层入湖时的水流特征,并对监测方案进行了探讨.

1 模型假设和基本方程

如图 1 所示,湖底坡度较缓,地下水为一潜水含水层.在无限大的含水层中,假定含水层底部为一隔水层或透水性比上面潜水含水层小很多,含水层是均质各向同性的,渗透系数为 K 并且以一固定厚度 H_1 水平向左无限延伸,含水层底面与湖底表面成 $\alpha\pi$ ($\alpha < 1/2$) 的顶锥角.

为了便于研究,将图 1 所示物理现象概化为图 2 所示概念示意图.其中 FG 断面为距离 A 点为 L 的某一垂直断面.假设 FG 断面上地下水流速分布均匀,即 FG 为一等势面.对于稳定的地下水流来说, C 点为地下水的渗出点,湖底表面 AB 为等势面.如图 3 所示,假设通过 C 点的等势面为一条折线,折线由两段直线组成,上直线 CC' 的坡度为 1:0.5,下段直线 CO 为一垂直线^[7,8].计算时将流量分为两部分,一部分是通过湖泊水面以

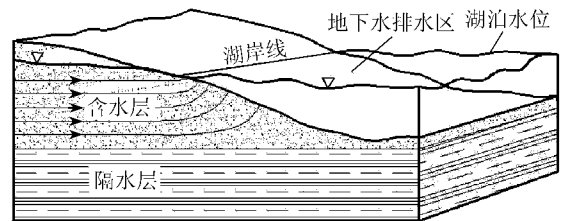


图 1 地下水向缓坡湖底的渗透示意图

Fig.1 Sketch of aquifer seepage to lake bottom with a gentle slope

上的三角形楔体 BCC' 的流量 q_1 ,另一部分是通过水面以下的梯形楔体 $OABC'$ 的流量 q_2 .

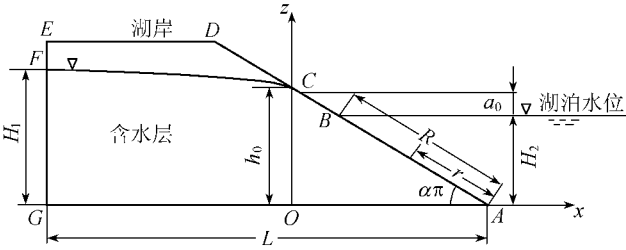


图 2 地下水向缓坡湖底渗透剖面概化图

Fig.2 Profile of aquifer seepage to lake bottom with a gentle slope

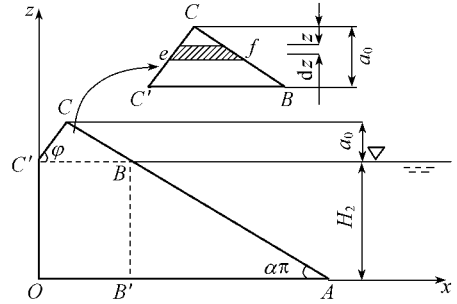


图 3 湖岸坡面渗流计算示意图

Fig.3 Schematic diagram of seepage calculation in littoral zone

如图 3 所示 ,从三角形楔体中取出一条高度为 dz 的流管 ,流管的渗流水头为 z ,流管的长度为 $ef=(0.5+m)z$,则通过该流管的渗流水力坡降为 $J=1/(m+0.5)$.根据达西定律 ,通过该流管的渗流量为

$$dq_1 = K \frac{1}{m+0.5} dz \tag{1}$$

从 0 到 a_0 积分上式 ,则通过整个三角形楔体的渗流量 q_1 为

$$q_1 = \int_0^{a_0} K \frac{1}{m+0.5} dz = K \frac{h_0 - H_2}{m+0.5} \tag{2}$$

式中 : K ——含水层渗透系数 ; $a_0 = h_0 - H_2$; $m = \cot(\alpha\pi)$.

同理 ,计算通过湖泊水面以下梯形楔体的渗流量 q_2 时 ,渗流平均水力坡降为 $J = a_0/[(m+0.5)a_0 + b]$,通过这一矩形的渗流量为

$$q_2 = K \frac{(h_0 - H_2)H_2}{(m+0.5)(h_0 - H_2) + mH_2(2m+1)} \tag{3}$$

则通过斜坡面的总渗流量为

$$q = q_1 + q_2 = K \frac{h_0 - H_2}{m+0.5} \left[1 + \frac{H_2}{h_0 + H_2(A-1)} \right] \tag{4}$$

其中 $A = m/[(m+0.5)^2]$.

如果 L 为足够长 ,或者说 FC 足够长 ,则可假设 FC 为一直线 .这样 , $FGOC$ 矩形中渗流的平均水力坡降为 $J = (H_1 - h_0)/(L - mh_0)$.因此 ,通过矩形 $FGOC$ 段的渗流量为

$$q = K \frac{H_1^2 - h_0^2}{2(L - mh_0)} \tag{5}$$

根据质量守恒原理 ,式(4)和式(5)中的 q 应该相等 ,即有

$$q = \frac{H_1^2 - h_0^2}{2(L - mh_0)} = \frac{h_0 - H_2}{m+0.5} \left[1 + \frac{H_2}{h_0 + H_2(A-1)} \right] \tag{6}$$

上述方程联立求解即可得出 h_0 和 q 的值 .

2 湖岸斜坡渗出坡降计算

渗流量和水力坡降密切相关 ,水力坡降的变化会影响到各点的渗流量甚至污染物的浓度 .根据试验研究 ,对于渗出段 BC ,其坡降可用下式表示^[7] :

$$J = J_0 \left(\frac{h_0 - H_2}{z - H_2} \right)^n \quad (z > H_2, H_2 \neq 0) \tag{7}$$

式中 : J_0 ——浸润线渗出点处的坡降值 ; n ——根据试验资料求得的系数 , $n = 0.25H_2/h_0$.

对于水面以下的浸没段 AB ,以 r 表示从坡脚 A 点到计算点的距离 ,则坡降可按以下公式确定^[7,8] :

$$J = cr^{2a-1} \quad (r \leq R) \tag{8}$$

其中 c 为待定常数,其余符号含义如图 2 所示.为了确定 c 值,写出 AB 段渗流量计算式

$$\frac{q}{K} = \int_0^R J dr = c \int_0^R r^{\frac{1}{2\alpha}-1} dr = 2\alpha c R^{\frac{1}{2\alpha}}$$

(9)

另一方面,根据式(3),通过 AB 段的渗流量为

$$\frac{q}{K} = \frac{(h_0 - H_2)H_2}{(m + 0.5)(h_0 - H_2) + mH_2(2m + 1)}$$

(10)

式(9)和(10)相等且有 $H_2 = R/\sqrt{1+m^2}$,则

$$c = \frac{\beta}{1 + \gamma H_2(h_0 - H_2)} L^{1-\frac{1}{2\alpha}}$$

(11)

$$\beta = \frac{1}{2\alpha(m + 0.5)\sqrt{1+m^2}} \quad \gamma = \frac{m}{2(m + 0.5)^2}$$

再将 c 代入坡降方程(8),则可得浸没段 AB 水力坡降分布的计算式为

$$J = \frac{\beta}{1 + \gamma H_2(h_0 - H_2)} \left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{2\alpha}-1}$$

(12)

或

$$J = \frac{\beta}{1 + \gamma H_2(h_0 - H_2)} \left(\frac{z}{H_2}\right)^{\frac{1}{2\alpha}-1}$$

(13)

由此可知,当含水层特征给定后,斜坡底上的水力坡降就与 m 或 $\alpha\pi$ 相关.令 $f_0 = (r/R)^{\frac{1}{2\alpha}-1}$,则可通过作图方法求得不同 r 和 m 时的 f_0 值.从函数关系看, r/R 越大,水力坡降 J 也越大,即越靠近岸边,渗流坡降越大. M 越大,即 $\alpha\pi$ 越小,水力坡降的较大值更加靠近湖泊的岸边,而且离湖岸较远处几乎不发生渗流.

3 单宽流量计算

研究表明,排水区中地下水向湖的排水速率是不恒定的.根据达西定律,均匀介质中单宽流量与水力坡降成正比.从湖岸坡面上水力坡降的分布也可以看出,其渗流量分布满足指数分布规律.

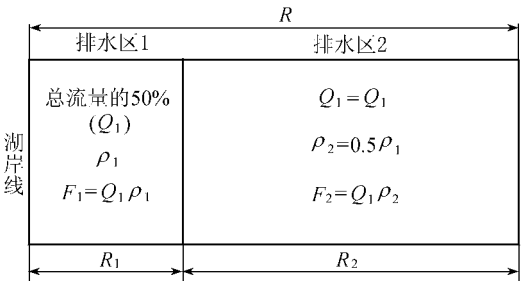
湖底表面 AB 任意点 z_0 位置的单宽流量 u_0 可表示为

$$u_0 = KJ \qquad q = KJW$$

(14)

其中 W 为渗流断面宽度,其他符号含义同前.

实际应用中,为了对地下水进行观测,通常需设置较多的压力计或渗流计,因此压力计的设置也将成为地下水入湖通量计算的关键.离 B 点越远,单宽渗流量 u_0 越小.可以将湖底渗流区(渗流带)划分为 2 个流量相等的区域,即当 R_1 取某个值时,单位宽度上 2 个区域的渗流量相等(图 4)^①.不同 $\alpha\pi$ 时总渗流量的 50% 和 90% 的排水区宽度计算结果如图 5 所示.由图 5 可知,倾角越小,对应的排水区 1 范围也越小,即 R_1/R 越小.这样,只要得出区域 1 的渗流量,就可以得出总的渗流量.因而,当某个浅水湖泊具有类似特性,岸坡倾角为 $\tan\alpha\pi = 0.2$ 或 $\tan\alpha\pi = 0.4$ 时,假设 $R = 50\text{ m}$,则只要监测和计算离岸距离约为 10 m 和 20 m 范围内的渗流量即可满足计算精度的要求.Charles^①在对 Moses 湖进行地质研究时发现,大约 50% 的地下水向湖的渗



注: ρ_1, ρ_2 为污染物质量浓度

图 4 渗流区分区
Fig.4 Division of seepage area into two zones with the same flux

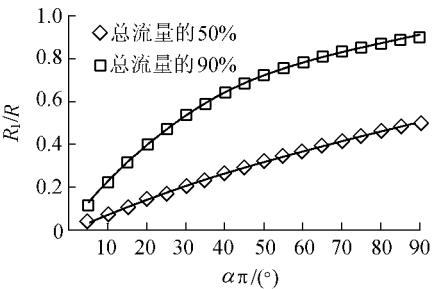


图 5 不同湖底倾角的排水区分布
Fig.5 Variation of R_1/R for 50% or 90% of total amount of seepage with bottom inclination

① CHARLES F P. Moses Lake total maximum daily load groundwater study. Washington :Environmental Assessment Program Olympia , 2003. 159—161.

流量集中在离岸 17 m 的范围内 ,约 90% 的地下水向湖的渗流量集中发生在离岸 60 m 的范围内。

4 结 论

- a. 具有不同坡度湖底的湖泊 ,含水层入湖渗流的水力特征不同 ,即使在同个湖泊的不同位置 ,水力特征也不尽相同 ,并且 Dupuit 假设不成立。
- b. 具有较缓坡度湖底的大型浅水湖泊 ,含水层的渗流量主要集中在湖岸带附近 ,排水区的宽度与含水层厚度和湖底坡度的大小等密切相关 ,湖底越缓 ,主要渗流量就越集中于湖岸。

参考文献：

[1] YOSHIKI F , ICHIRO K. A theoretical analysis of seepage flow of confined groundwater into the lake bottom with a gentle slope[J]. Water Resources Research , 1988 , 24(11) : 1949—1953.

[2] SHAW R D , PREPAS E E. Groundwater-lake interactions : I. Accuracy of seepage meter estimates of lakes seepage [J]. Journal of Hydrology , 1990 , 119 : 105—120.

[3] SHAW R D , PREPAS E E. Groundwater-lake interactions : II. Nearshore seepage meter patterns and the contribution of groundwater to lakes in central Alberta[J]. Journal of Hydrology , 1990 , 119 : 121—136.

[4] SHAW R D , SHAW J F H , FRICKER H , et al. An integrated approach to quantify groundwater transport of phosphorus to Narrow Lake , Albert [J]. Limnol Oceanogr , 1990 , 35(4) : 870—886.

[5] HASHEM A F , LUIS A G , MAURICE M A. Development of a model for simulation of solute transport in a stream-aquifer system[J]. Environmental Modeling and Assessment 2002 , 7 : 191—206.

[6] 黄漪平. 太湖水环境及其污染控制[M]. 北京 : 科学出版社 , 2001. 143.

[7] 苑莲菊 , 李振栓 , 武胜忠 , 等. 工程渗流力学及应用[M]. 北京 : 中国建材工业出版社 , 2001. 229—234.

[8] 顾慰慈. 渗流计算原理及应用[M]. 北京 : 中国建材工业出版社 , 2000. 23—29.

Calculation of typical unconfined aquifer seepage to
a shallow lake with gentle slope bottom

LI Yong^{1 2 3} , WANG Chao^{1 2 3}

- (1. Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
- 2. College of Environmental Science and Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
- 3. Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources Exploitation on Shallow Lakes , Ministry of Education , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :The intention of the paper is to formulate a simple estimation model of groundwater discharge from a nearshore unconfined aquifer to a lake by using a hydraulic method. It was supposed that the aquifer was of isotropic permeability with a constant thickness and obliquity and extended unlimitedly toward the lake with a gentle slope. The distributions of hydraulic gradient and specific discharge along the transect of the discharge zone were discussed. The result shows that the aquifer seepage varies with the inclination of the nearshore bottom of the lake. For a large shallow lake with a gentle slope bottom , the aquifer seepage mainly concentrates in the littoral zone where the Dupuit assumptions are invalid , and flows into the lake through the upper section of interface between the lake bottom and aquifer. Moreover , the width of the discharge zone , the thickness of the aquifer and the gradient of the lake bottom are closely related to each other.

Key words :shallow lake ; unconfined aquifer ; seepage ; hydraulic gradient