

乞盖淖湖湖床垂向渗透系数试验研究

尹立河¹, 李 瑛¹, 窦 妍², 崔旭东¹, 黄金廷¹

(1. 西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054;

2 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:地下水与湖水的转化必须要通过湖床沉积物, 因此湖床渗透系数是评价湖水与地下水定量转化关系的基础。以内蒙古伊金霍洛旗乞盖淖湖为例, 首先分析了湖床沉积物的颗粒组成, 然后利用现场渗透试验方法进行了野外试验, 计算了湖床的垂向渗透系数。湖床沉积物粒径分析结果表明, 湖床沉积物以粉细沙为主。湖床垂向渗透系数计算结果表明, 各测点的平均垂向渗透系数介于 0.83~13.59 cm/d 表明乞盖淖湖床垂向渗透性能在空间上具有非均质性。该研究为定量计算地下水与湖水的转化关系提供了基础参数。

关键词: 乞盖淖湖; 湖床; 垂向渗透系数; 现场测试

中图分类号: P343.3

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2009)03-0023-06

0 前 言

随着鄂尔多斯能源化工基地的建设^[1], 地下水开采量将大幅增加。鄂尔多斯高原湖泊众多, 据统计大大小小的湖泊共有 853 个, 其中湖泊面积超过 1 km² 就有 139 个^[2], 这些湖泊与地下水有着密切的联系, 是地下水的主要排泄地^[3]。在地处干旱一半干旱地区的鄂尔多斯高原, 湖泊生态系统是最重要的生态景观之一。地下水的开发是否会影响到湖泊生态系统, 是大规模地下水开发利用前必须要回答的问题。地下水与湖水的转化必须要通过湖床沉积物, 本文利用现场渗透试验的方法, 以位于鄂尔多斯高原伊金霍洛旗的乞盖淖为例, 开展了野外原位渗透实验, 以期确定湖床的垂向渗透系数, 为定量计算湖水与地下水的转化奠定基础。

湖床渗透系数是地下水与湖水水力关系研究中的重要参数之一。在生产实践和科学研究中, 国内外的学者提出了多种湖床垂向渗透系

数的测试方法, 常用的方法有数值模拟方法^[4]、Slug 测试方法^[5-7]、现场渗透试验^[8-11]、化学示踪方法^[12-13]和颗粒分析方法^[14]。但是这些方法的实用性、准确性和费用具有一定的差异, 数值模拟方法和化学示踪方法需要花费大量的人力和物力, 沉积物粒径分析方法本身具有一定的缺陷, 而 Slug 测试方法对测试层的扰动太大, 不能代表真实值。Landon 等人^[15]对常用的几种测试方法进行了对比研究, 结果表明现场渗透试验方法具有快速、经济和结果可靠的特点, 是目前最为广泛使用的测定湖床渗透系数的一种方法。本文将利用现场渗透试验方法开展野外现场试验, 计算乞盖淖湖的湖床垂向渗透系数。

1 研究区概况

乞盖淖也称为七盖淖或是赤盖淖, 系咸水湖。乞盖淖均为蒙古语, “乞盖”为蒙古语“其和”的谐音, 意为“白里泛青的”, “淖尔”为湖。

乞盖淖位于鄂尔多斯高原东北部伊金霍洛旗纳林希里乡驻地东南部,为纳林希里、红庆河、公尼召三乡界湖,其周围还分布有乌兰淖、巴汗淖等湖泊(图 1)。地理位置为北纬 39°22',东经 109°23'。根据乞盖淖湖东北 50 km 伊金霍洛旗近 50 年的气象资料,研究区内多年平均气温为 -10.1~13.6℃,年平均降水量为 335 mm,降水主要集中在夏季的 7~9 月,约占全年降水量的 70%。而蒸发量则大大高于降水量,高达 2 300 mm,因此本区是典型的干旱一半干旱地区。乞盖淖是三面封闭,一面与一条季节性河流相连的湖泊(图 1)。湖滩上的植物以寸草和碱草为主,夏季湖区有大量的水鸟栖息。

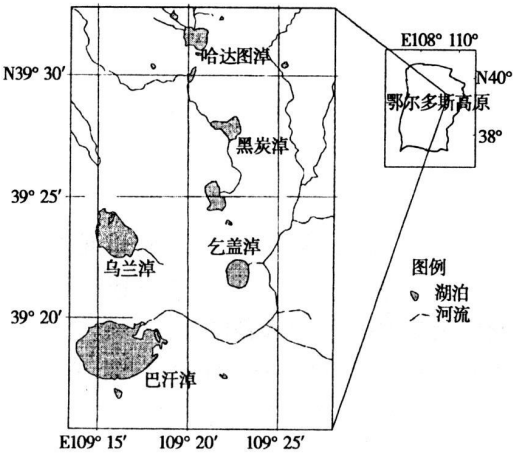


图 1 乞盖淖地理位置图
Fig 1 Location of Qigai lake

2008 年 4 月,对乞盖淖湖床的形态进行了测量,测量结果见图 2。湖床形态如箕形,北、东、西高,南底,湖水最大深度为 2.39 m,平均湖水深度 1.37 m。乞盖淖湖面面积年际变化比较小,从 4 月开始,随着蒸发量的增大,湖面面积不断减小,至 8 月份到达最小值,然后逐渐增大。尽管在雨季(7~9 月)每次降雨后湖面面积有所增大,但在 2007~2008 年的野外调查中发现,雨季的最大面积均小于当年 4 月的湖面面积。调查结果表明,2008 年 3 月 15 日,湖面面积最大为 2.76 km²;7 月 27 日,湖面面积最小为 2.57 km²。

2008 年对湖水和湖周围的地下水开展了水位动态观测工作。图 3 是湖西北部一动态观

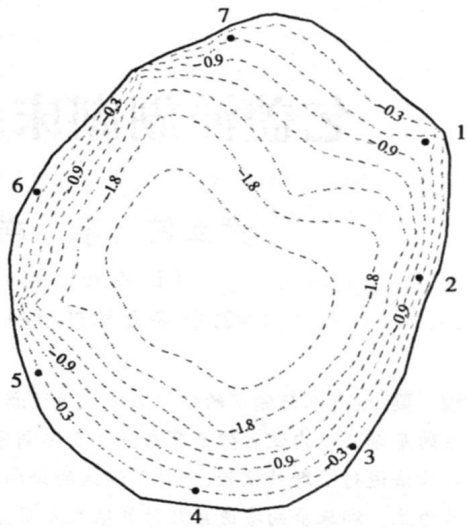


图 2 乞盖淖湖床形态等值线
(图中黑点代表原位渗透试验点)
Fig 2 Bathymetric contours map of Qigai lake
(heavy dots stand for permeation test position)

测孔与湖水位动态关系的曲线图,从图中可以看出,除在 7、8 月份,湖水短暂补给地下水之外,一年中大部分时间地下水补给湖水。因此地下水是湖水的重要补给源,本次研究将为定量研究地下水与湖水的转化量提供基础参数。

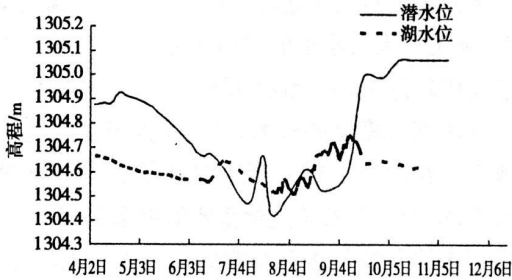


图 3 湖水位与 QGN1 号孔潜水位图
Fig 3 Changing chart of lake water level and ground water level of QGN1 hole

乞盖淖为一咸水湖,根据 2008 年 6~9 月定期湖水水化学样品测试的结果,湖水的水化学类型为 NaCl 型水。湖水的 pH 值在 9.5 左右,总硬度介于 461~702 mg/L,总碱度 2 133~3 196 mg/L,湖水的矿化度介于 7.7~10.8 g/L 之间。6 月之前,蒸发量小,低矿化度的地下水持续补给湖水,表现为湖水的矿化度较低为

8.8 g/L。到了 7 月之后,随着蒸发量的增大,湖水不断浓缩,矿化度达到年内的最高值为 10.8 g/L。到了 9 月之后,随着蒸发量的减小,矿化度不断降低,至 7.7 g/L。

2 原位渗透试验原理

现场渗透试验方法主要包括两大类,一类是降落水头法,另一类是定水头法;对测试数据的解译方法主要有达西定律方法和 Hvorslev 方法。本文采用 Hvorslev 降落水头渗透方法现场测定乞盖淖湖湖床的渗透系数,这是因为 London 等人^[15]对测定湖床渗透系数的各种物理方法进行了对比,发现 Hvorslev 降落水头渗透方法(Hvorslev falling-head permeameter test)是最有效的原位测试方法。图 4 是这种方法的示意图,湖床垂向渗透系数可以利用 Hvorslev 公式^[16]求解。

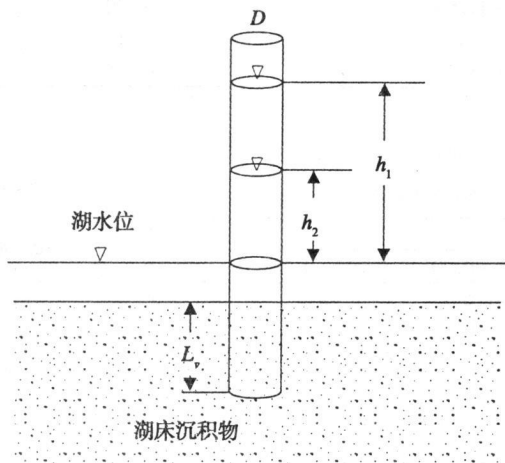


图 4 原位降落水头渗透方法示意图

Fig 4 Schematic diagram of the falling-head permeation test

$$K_v = \frac{\frac{\pi D}{11m} + L_v}{(t - t_0)} \ln(h_1 / h_2) \quad (1)$$

式中 K_v 是湖床的垂向渗透系数 (cm/d), D 是测试管的内径 (cm), L_v 是测试管中湖床沉积物的长度 (cm), h_1 (cm) 和 h_2 (cm) 分别是 t 和 t_0 时刻测试管中水柱高度, $m = \sqrt{K_h / K_v}$ 是均质系数,其中 K_h 代表水平渗透系数。通常情况下, m 的值是未知数,在大多数情况下假定为 1。

由于湖床的水平和垂向渗透系数一般不相等,因此这种假定会带来一定的误差,为了克服这一问题,Chen^[17]提出了一种简化的计算方法,即

$$K_v = \frac{L_v}{(t - t_0)} \ln(h_1 / h_2) \quad (2)$$

这种简化的实质就是假定 m 值很大,即湖床沉积物高度非均质,因此它会低估湖床的渗透性能。为了评估这种方法的准确性,作者对 $1 < m < 10$ 的范围内,方程 2 和方程 1 误差进行了评估。评估方法为 $[(K_{\text{方程2}} - K_{\text{方程1}}) \times 100\%] / K_{\text{方程1}}$, 计算结果见图 5。图 5 表明当 L_v / D 的比值大于 5 时 (即测管中的湖床沉积物长度与测管直径之比大于 5 时), 对于任何非均质的湖床,利用式 (2) 计算的垂向渗透系数的误差均小于 5%。

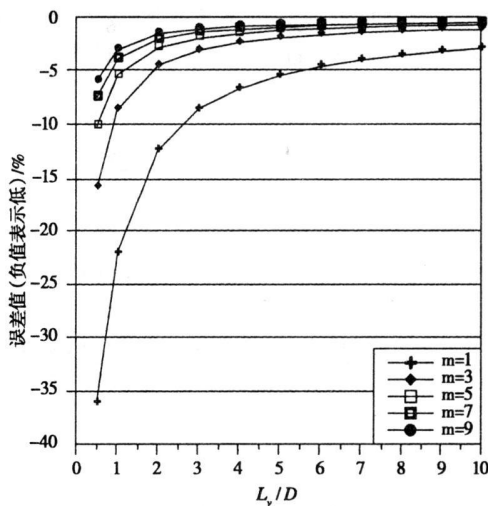


图 5 方程 2 误差图

Fig 5 Errors produced by equation 2

3 数据采集与试验结果

为了测定乞盖淖湖湖床的垂向渗透系数,在湖床上布置了 7 个原位测试点 (图 2)。这些原位测试点主要集中在湖岸边,这是因为国内外的学者研究表明,湖水与地下水的交换主要是集中在岸边,向湖心方向两者的交换量呈指数衰减^[18-20]。测试管为长度 100 cm PVC 管,内径为 5 cm。首先将测试管插入湖床沉积中一

定深度,为了满足式 (2)的求解精度,在本次试验中所有的管内沉积物为 30 cm(表 1)。然后向测试管中注水至高度 h_1 ,利用万用表人工观测管内的水位 h_2 。为了减小人工观测误差,每次观测 3 次,然后利用 3 次观测的平均值作为最后的观测值。为了确定每个测点上湖床沉积物的类型,在所有测点上采取了湖床沉积物。样品采集后首先进行烘干,取烘干后的样品 300 g 利用比重计进行测量,试验过程按《土工试验规范》进行操作。试验结果和颗粒级配曲线见表 2 和图 6。

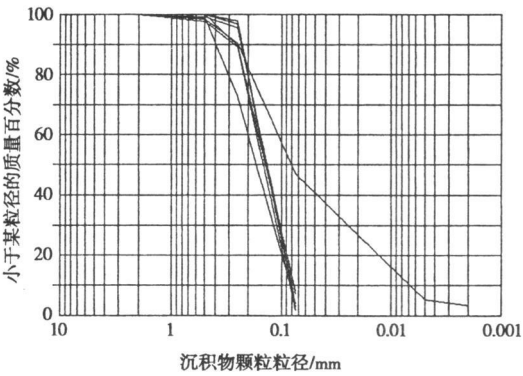


图 6 湖床沉积物颗粒级配曲线
Fig 6 Grain size curves of lakebed sediments

表 1 乞盖淖湖湖床测试试验结果表

Table 1 Results of permeation test					
测试点	管内沉积物长度 /cm	测试时间 /h	垂向渗透系数的变化范围 /(cm/d)	平均垂向渗透系数 /(cm/d)	
1	30	42	0.47~1.23	0.83	
2	30	36	0.32~1.91	1.43	
3	30	6	6.59~17.28	13.59	
4	30	4	8.57~9.44	8.97	
5	30	5	8.67~11.60	10.30	
6	30	5	11.37~14.51	13.16	
7	30	6	8.68~18.21	10.84	

表 2 测点沉积物颗粒分析结果

Table 2 Results of grain size analysis							$\omega(\%)$
编号	粒径范围 /mm						土壤类型
	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	0.005~0.002	0.002	
1	1.6	7.9	43.6	41.6	2	3.3	粉砂
2	0.9	3.6	88.3	7.2			细砂
3		3	93.9	3			细砂
4		2	93.9	4.1			细砂
5	2.5	8.3	87.6	1.7			细砂
6		10.2	81.6	8.2			细砂
7	1	26.3	68.7	4			细砂

从表 2 可以看出乞盖淖湖床沉积物比较均一,以细砂为主。其中 1 号测点的湖床沉积物较其他几组要细,沉积物类型为粉砂。级配曲线以粒径为横轴,取对数坐标,纵轴为小于某粒径的沉积物质量百分数。从级配曲线上看,除 1 号点外,其他各测点相互重叠,表明他们的颗粒组成非常相似。

由式 (2) 可知,对于测试管中测得的任意两个水位,就可以计算出一个湖床的垂向渗透系数。利用测试管内测得的数据,我们对每一个测试管进行了一系列的计算,最多的一个测

管计算的垂向渗透系数达 15 个,然后对所有计算的垂向渗透系数求平均值,作为每个测试点上的湖床垂向渗透系数,每个测管内的沉积物的垂向渗透系数的变化范围和平均值见表 1。

从表 1 中可以看出,由于湖床沉积物中以细砂为主,乞盖淖湖湖床的垂向渗透系数很低。平均垂向渗透系数为 0.83~13.59 cm/d。同时,从表 1 中可以看出,在不同地点,垂向渗透系数变化较大,表明湖床的渗透系数在空间上具有非均质性。测试结果可以分为 2 组,第 1 组包括测点 1~2 第 2 组包括其余测点。第 1

组的垂向渗透系数小,表明在乞盖淖湖的北部和东北侧,湖床沉积物的渗透系数最小。这是因为北部有一条季节性河流,湖床中细粒沉积物较多。第 2 组的渗透系数大,表明这段湖床的沉积物结构比较松散。

由于测点主要是分布在湖床边缘,地表径流所携带的粗粒物质首先在湖床的边缘沉淀,因此湖床沉积物砂质含量要比湖心高,本次所测得的湖床的垂向渗透系数可能会偏高。利用本次研究成果计算出的地下水与湖水的交换量应视为两者间最大的可能交换量。

4 结 论

本文以鄂尔多斯高原的乞盖淖为例,利用 Hvorslev 降落水头渗透方法野外测试了乞盖淖湖床的垂向渗透系数。结果表明,乞盖淖湖床的垂向渗透系数介于 $0.83 \sim 13.59 \text{ cm/d}$ 之间,湖床在空间上具有非均质性。这项研究为定量评价乞盖淖湖区地下水与湖水的转化关系提供了基础。可以看出,不论是在湖床沉积物颗粒组成上,还是在垂向渗透系数上,在空间上都具有非均质性。因此在进行湖水与地下水定量关系研究中,不能简单的应用某一点上测得的垂向渗透系数来计算两者的补排量,而是应将湖床分为几个部分来计算。根据本次计算的结果,建议以湖心为中心,以湖心与 1 号、2 号点的连线为边界,将湖区分分为两个区。根据本次研究计算的湖床渗透系数,1~2 号点的区域湖床垂向渗透系数取值为 1.6 cm/d 其他地区取值为 11.37 cm/d 。

致谢: 西安地质矿产所的侯光才教授级高级工程师、陶正平高级工程师和赵振宏高级工程师对野外和室内分析工作给予了指导,龚蓓高级工程师绘制了论文中的部分插图,特表谢意。

参考文献:

- [1] 侯光才,张茂省,刘方,等. 鄂尔多斯盆地地下水勘查研究 [M]. 北京:地质出版社, 2008.
- [2] 侯光才,张茂省,刘方,等. 鄂尔多斯盆地地下水勘查报告 [R]. 西安:中国地质调查局西安地质调查中心, 2006.
- [3] Hou G C, Liang Y P, Su X S, et al. Groundwater systems and resources in the Ordos basin, China [J]. Journal of the Geological Society of China, 2008, 85(5): 1061—1069.
- [4] Yager R M. Estimation of hydraulic conductivity of a riverbed and aquifer system on the Susquehanna River in Broome county, New York [R]. Washington: U. S. Geological Survey, 1993.
- [5] Cey E E, Rudolph D L, Parkin G W, et al. Quantifying groundwater discharge to a small perennial stream in southern Ontario, Canada [J]. Journal of Hydrology, 1999, 210(1): 31—37.
- [6] Springer A E, Petroustson W D, Semmens B A. Spatial and temporal variability of hydraulic conductivity in active reach attachment bars of the Colorado River Grand Canyon [J]. Ground Water, 1999, 37(3): 338—344.
- [7] Rus D L, McGuire V L, Zurbuchen B R, et al. Vertical profiles of streambed hydraulic conductivity determined using slug tests in central and western Nebraska [R]. Washington: U. S. geological survey, 2001.
- [8] Ryan R J, Boufadel M C. Evaluation of streambed hydraulic conductivity heterogeneity in an urban watershed [J]. Stochastic environmental research and risk assessment, 2007, 21(4): 309—316.
- [9] 李伟,束龙仓. 湖区地层垂向渗透系数概率分布特征分析 [J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(2): 20—22.
- [10] 束龙仓,李伟. 北塘水库库底地层渗透系数的随机特性分析 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2007, 38(2): 216—220.
- [11] 温忠辉,束龙仓,李伟. 测管特性对湖底地层渗透系数测定值的影响 [J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(2): 19—20.
- [12] Harvey J W, Bencala K E. The effect of streambed topography on surface-subsurface water exchange in mountain catchments [J]. Water Resour Res, 1993, 29(1): 89—98.
- [13] Hart D R, Mulholland P J, Marzolf E R, et al. Relationships between hydraulic parameters in a small stream under varying flow and seasonal conditions [J]. Hydrological Processes, 1999, 13(10): 1497—1510.
- [14] 王万杰,束龙仓,王志华. 河床沉积物渗透系数试验研究 [J]. 中国农村水利水电, 2007(2): 136—138.
- [15] Landon M K, Rus D L, Harvey E E. Comparison of in-stream methods for measuring hydraulic conductivity in sandy streambeds [J]. Ground Water, 2001, 39(6): 870—885.
- [16] Hvorslev M J. Time lag and soil permeability in groundwater observations [R]. Mississippi Waterways Experiment Station, 1951.
- [17] Chen X H. Streambed hydraulic conductivity for rivers in south-central Nebraska [J]. Journal of the American Water

Resources Association, 2004, 40(3): 561—573.

[18] 李勇,王超.典型潜水含水层通过缓坡湖底的渗流量计算[J].河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(4): 14—17.

[19] Fukuo Y, Kaihosti I A. theoretical ahalysis of seepage flow of confined groundwater into the lake bottom with a gentle slope[J]. Water Resources Research, 1988, 24(11): 1944—1953.

[20] Shaw R D, Prepas E E. Groundwater lake interacctions I. Accuracy of seepage meter estimates of lakes seepage[J]. Journal of Hydrology, 1990, 119(1—4): 105—120.

[21] 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(1—4): 121—136.

In-situ Vertical Hydraulic Conductivity Test for Qigainao Lake

YN Li¹he, LI Ying¹, DOU Yan², CUI Xu-dong¹, HUANG Jin-ting¹

(¹ Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources Xi'an 710054, China;

² Environmental Science and Engineering College Changan University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Exchange between ground water and lake water must be through lakebed, thus lakebed hydraulic conductivity is the basis for quantitative assessment of lake water and ground water transformation. The paper presents hydraulic conductivities of lakebed measured in Qigainao lake in Yijinhualuo, Inner Mongolia. Grain size distribution was determined, then in situ permeation tests were conducted to evaluate the vertical hydraulic conductivities (K_v). Grain size analysis shows that lakebed consists mainly of fine sand. Results show that K_v of the lakebed is heterogenous in space. The average K_v values vary from 0.83 to 13.59 $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ which provides basic parameter to qualify exchange rates between ground water and lake ater.

Key words: Qigainao Lake; Lakebed; Vertical hydraulic conductivity; In situ test