

湖区地层垂向渗透系数概率分布特征分析

李 伟 束龙仓

(河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了确定某湖区湖水与地下水的交换水量, 根据湖底地层渗透系数的野外现场测定值, 用适线法和蒙特卡罗法对研究区地层垂向渗透系数的概率分布进行拟合, 在此基础上, 分析了渗透系数试验测定值的可靠性. 结果表明: 与正态分布和均匀分布相比较, 湖底地层垂向渗透系数概率分布较接近对数正态分布, 渗透系数超过测定均值的概率在 30% 以上.

关键词: 湖区地层; 垂向渗透系数; 概率分布; 适线法; 蒙特卡罗法

中图分类号: P641 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2005)02-0020-03

Probability distribution characteristics of vertical hydraulic conductivity in substrate of lake areas//Li Wei, SHU Long-cang College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to calculate the volume of water exchange between groundwater and surface water in a lake area, the curve fitting method and Monte-Carlo method were used for fitting the probability distribution of vertical hydraulic conductivity based on the data from in situ measurement, and the reliability of measured data was analyzed. The result showed that the probability distribution of vertical hydraulic conductivity in substrate of the lake area was much close to the log-normal distribution, and the probability for the hydraulic conductivity over the mean value was more than 30%.

Key words: substrate of lake area; vertical hydraulic conductivity; probability distribution; curve fitting method; Monte-Carlo method

无论是在地表水与地下水资源统一管理的研究中, 还是在地下水资源评价中, 诸如渗透系数等水文地质参数的准确获取, 无疑是至关重要的. 然而, 由于地层, 尤其是含水层介质的非均质性, 采用野外试验等传统方法很难完全揭示水文地质参数在某一范围内的变化规律. 而且, 诸如观测误差、试验方法等人为因素对所得结果的准确性也会不可避免地造成一定影响. 如何根据相对有限的已知数据信息来推求含水层参数总体分布特性, 是水文地质学界备受关注的问题. 早在 20 世纪 70 年代, Cooley^[1]就提出了用随机模型确定地下水系统中参数的方法. 近些年来, 在国内, 空间分布参数统计分析方法、有限元与卡尔曼滤波耦合算法、蒙特卡罗法等数学方法也相继被应用于水文地质参数空间分布的研究中^[2~4]. 在本文中, 以野外试验所获取的数据为基础, 采用在水文学领域内广泛使用的适线法和作为风险分析方法之一的蒙特卡罗法对研究区内地层垂向渗透系数的分布特征进行深入分析, 同时, 对所获取渗透系数值的可靠性进行了统计分析.

1 研究区概况

研究区位于江苏省张家港市, 是一人工湖区. 湖

区周围地面高程 6 m 左右, 第四系覆盖层的厚度为 90 ~ 240 m, 属于全新统现代沉积. 人工湖设计水深为 5 m 左右, 湖底地层岩性主要为砂质黏土和黏土. 考虑到湖建成后正常蓄水时, 湖水会有渗漏损失, 为了确定补充水量, 需要对湖底地层的渗透特性进行研究. 为此, 首先进行了野外试验. 在约 1 km² 的湖区范围内大致均匀布设 29 个测点, 用竖管法^[5, 6]对湖底地层的垂向渗透系数进行现场测定. 数据处理结果如表 1 所示. 从表 1 结果来看, 研究区湖底地层为

表 1 各测点垂向渗透系数计算结果

测点 编号	K/ (10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹)	测点 编号	K/ (10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹)	测点 编号	K/ (10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹)
1	1.26	11	2.24	21	5.44
2	1.43	12	1.11	22	6.07
3	1.44	13	0.79	23	1.45
4	2.52	14	1.22	24	0.53
5	5.94	15	0.72	25	2.10
6	5.58	16	0.56	26	1.31
7	4.87	17	1.69	27	2.71
8	3.45	18	6.17	28	5.24
9	3.14	19	0.93	29	5.17
10	4.58	20	0.30		

注: 垂向渗透系数均值为 2.76 × 10⁻⁷ cm/s.

非均质,渗透性等级属于极微透水^[5,6]。为了较准确地掌握湖水与地下水之间的交换水量,本文将试验所测数据作为一组样本,用适线法和蒙特卡罗法对垂向渗透系数的概率分布特征和数据结果的可靠性进行探讨。

2 研究区内垂向渗透系数的概率分布研究

2.1 适线法

适线法是一种参数估计方法,其实质是通过样本的经验分布去估计总体的概率分布^[7]。适线法在水文学领域推求设计洪水方面应用最为广泛,在水质评价中也得到了尝试性应用^[8]。本文将其应用于推求湖区地层垂向渗透系数的概率分布。

适线法的一般步骤是,首先用经验频率公式计算样本的经验频率,并将其点绘在格纸上,然后假定总体分布,在同一格纸上绘出此分布的累计频率曲线,最后通过调整总体分布参数的方法,改变曲线形状来拟合经验频率点。

对于经验频率公式的选取,在水文学领域已进行了广泛深入的探讨^[9],在此选用 Weibull(数学期望)公式:

$$P_m = \frac{m}{n+1} \quad (1)$$

式中: P_m 为样本中个体的经验频率; n 为样本容量; m 为样本由大到小的排列序号。

另外,对于总体分布的假定,尝试性选择了正态分布、对数正态分布和 P-III 型分布,适线法结果如图 1 所示。需要指出,为了适线方便,图中坐标选用正态概率格纸坐标,在此坐标系内,正态分布函数曲线为一直线^[10]。

从图 1 可以看出,3 种分布相比较,正态分布的拟合效果较差,对数正态分布与 P-III 型分布拟合效果相差不多。表 2 中列出了对数正态分布和 P-III 型分布的概率统计情况(由于从图 1 中反映出的正态分布拟合效果不是十分理想,所以在表 2 中没有罗列相应统计值)。

表 2 适线法垂向渗透系数概率统计

$K/(10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$P/\%$		$K/(10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$P/\%$	
	对数正态分布	P-III 型分布		对数正态分布	P-III 型分布
>20	0.08	0.05	>1	80.0	74.0
>10	1.6	2.0	>0.8	85.0	80.0
>8	3.6	4.8	>0.6	90.0	88.0
>6	9.0	10.0	>0.4	94.0	96.0
>4	22.0	22.0	>0.2	97.0	—
>2	54.0	48.0	>2.76	38.1	36.4

从表 2 中可看出,在研究区范围内假定垂向渗透系数分别服从对数正态分布和 P-III 型分布时,渗

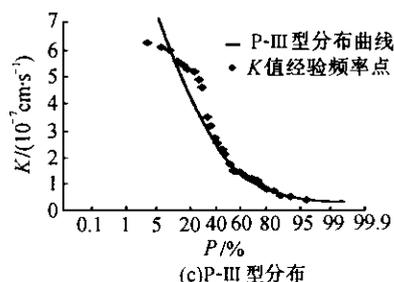
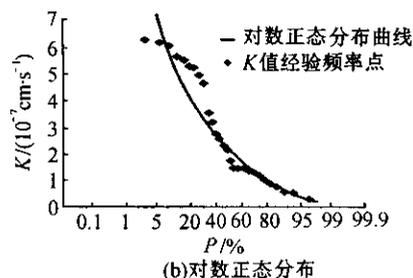
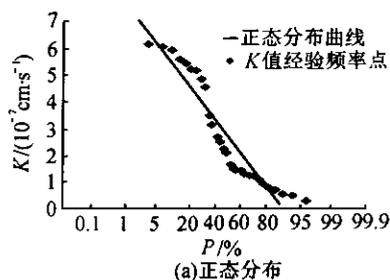


图 1 适线法结果

透系数大于计算所得均值($2.76 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$)的概率分别在 38% 和 36% 左右,两类分布所得出的结论是基本一致的。

严格意义上讲,适线后还要根据样本对各分布进行拟合优度的假设检验,然而检验方法一般要求样本容量足够大,笔者考虑到实际数据资料情况,在本研究中未能对 3 类概率分布进行假设检验,在此仅作一般性分析。

2.2 蒙特卡罗法

蒙特卡罗(Monte-Carlo)法也称为随机模拟方法,它的基本思想是,为了求解数学、物理、工程技术以及生产管理等方面的问题,首先建立一个概率模型或随机过程,使它的参数等于问题的解,然后通过模型或过程的观察或抽样试验来计算所求参数的统计特征,最后给出所求解的近似值^[11]。国内将蒙特卡罗法用于地下水系统不确定性特征分析的研究,在上世纪末刚刚起步,束龙仓等^[12,13]用此方法对地下水可开采量的可靠性以及水文地质参数概率分布特征进行了较为深入的研究。

本文借用蒙特卡罗法模拟抽样,以产生大量的垂向渗透系数样本,以此来分析其在研究区内的分布特征。为了对不同分布的模拟结果进行对比分析,在此选择对数正态分布、正态分布和均匀分布进行计算,具体步骤如下:

a. 用混合同余法构造产生伪随机数,其递推公式为

$$X_{i+1} = \lambda X_i + c \quad (2)$$

$$Y_{i+1} = \frac{X_{i+1}}{m} \pmod{m} \quad (3)$$

式中: X, λ, c 和 m 都取非负整数。

按公式(2)(3)由计算机产生的伪随机数序列为 $[0, 1]$ 上的均匀分布随机数,然后要将其转换为给定参数的各类分布随机样本值,即进行抽样。本文中,采用矩法对总体方差和均值进行估计,其中方差选用无偏估计量 S^{*2} ,计算公式为

$$S^{*2} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (4)$$

则有^[10] $\mu = \bar{X} \quad \sigma^2 = S^{*2} \quad (5)$

b. 采用统计近似法,产生均值为 μ 、方差为 σ^2 的正态分布随机数 Y ,其计算公式为

$$Y = \mu + \frac{\sigma \left(\sum Rn_i - \frac{n}{2} \right)}{\left(\frac{n}{12} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (6)$$

其中 n 足够大,通常取 $n = 12$,其近似程度已经相当好了,因此有

$$Y = \mu + \sigma \left(\sum Rn_i - 6 \right) \quad (i = 1, \dots, 12) \quad (7)$$

式中: Rn_i 为 $[0, 1]$ 上服从均匀分布的随机数^[14]。用上述方法进行模拟的结果如图 2 所示。

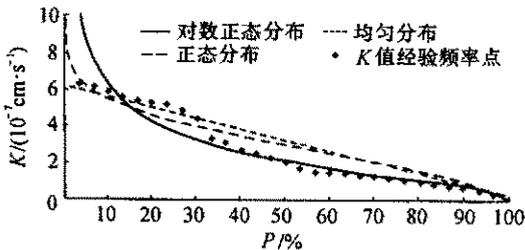


图 2 对数正态分布、正态分布、均匀分布概率曲线

从图 2 中可以看出,与正态分布和均匀分布相比,对数正态分布拟合效果较好,尤其是在渗透系数的低值区,对数正态分布明显优于其余两类分布。模拟结果表明,对于此 3 类分布,渗透系数超过计算均值 ($2.76 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$) 的概率都在 30% 以上,特别地,对于正态分布和均匀分布都接近 60%。

3 结论

本文中,将适线法和蒙特卡罗法应用于地层垂向渗透系数概率分布特性分析。综合两种方法所得结果,可得,对于本研究区湖底地层而言,与正态分布和均匀分布相比,垂向渗透系数的概率分布更接近对数正态分布,这与文献^[15~18]的研究结论是一致的,同时也验证了在分析水文地质参数分布特

性时,适线法是可行的。

当假定研究区内垂向渗透系数服从对数正态分布和 P-III 型分布时,垂向渗透系数超过计算均值的概率在 30% ~ 40% 之间;当假定其服从正态分布和均匀分布时,其概率值都高于 50%。由此可见,在一定区域内选取参数均值进行水文地质计算的传统做法,所得结果不是十分可靠,有必要采取适线法或蒙特卡罗法等数学方法对计算结果进行进一步的可靠性分析,以便管理决策。

最后需要指出,此次野外试验中,在约 1 km^2 范围内布设 29 个测点分别计算垂向渗透系数,取样密度远大于传统方法。但是,对于研究渗透系数的空间分布特性而言,样本容量还是相对较小,所获取的信息不足以用来对参数概率分布进行细致深入的研究。对于本湖区地层的渗透特性还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] Cooley R L. A method of estimating parameters and assessing reliability for models of steady state groundwater flow, 1 theory and numerical properties[J]. Water Resources Research, 1977, 13(2): 318—324.
- [2] 张征, 刘淑春. 地下水环境评价中分布参数随机性的空间统计分析[J]. 环境科学学报, 1999, 19(4): 410—414.
- [3] 仵彦卿. 估计地下水系统分布型确定性-随机性参数的耦合算法[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(2): 113—121.
- [4] 束龙仓, 朱元牲, 孙庆义, 等. 地下水允许开采量确定的风险分析[J]. 水利学报, 2000(3): 77—81.
- [5] 迟宝明, 束龙仓. 张家港暨阳湖湖底沉积物渗透系数的现场测定[J]. 吉林大学学报, 2003, 33(4): 539—541.
- [6] 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.
- [7] 姜铁兵, 康玲, 沈同林, 等. GA 适线法软件设计在水文频率计算中的应用[J]. 华中理工大学学报, 1999, 27(5): 52—53.
- [8] 姚允龙. 频率曲线法及皮尔逊 III 型曲线在水质评价中的应用探讨[J]. 水文, 2001, 21(1): 42—43.
- [9] 黄振平, 萨迪伊, 王春霞, 等. 关于适线法中经验频率计算公式的对比研究[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(5): 5—7.
- [10] 王俊德. 水文统计[M]. 北京: 水力电力出版社, 1993. 150—151.
- [11] 徐钟济. 蒙特卡罗方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. 5—6.
- [12] 束龙仓, 朱元牲, 孙庆义, 等. 地下水资源评价结果的可靠性探讨[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 21—24.
- [13] 束龙仓, 朱元牲. 地下水资源评价中的不确定性因素分析[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(6): 6—8.

(下转第 66 页)

特性研究 J]. 水利学报, 1999(4): 57—64.

- [14] 杨桂芳. 静力本构模型试验、参数确定及参数对计算结果的影响分析 D]. 成都: 四川大学, 1999.
- [15] 谢定义. 土动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [16] 吴世明. 土动力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [17] Bobby O H, Vincent P D. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, 98 (SM6): 603—624.
- [18] 吴世明, 徐攸在. 土动力学现状与发展 [J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 125—130.
- [19] 汪闻韶. 往返荷载下饱和砂土的强度、液化和破坏问题 [J]. 水利学报, 1980(1): 14—26.
- [20] 许才军, 周红波. 不排水循环荷载作用下饱和软粘土的孔压增长模型 [J]. 勘察科学技术, 1998(1): 3—7.
- [21] 汪闻韶. 土的动力强度和液化特性 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [22] 张建民, 谢定义. 饱和砂土本构理论的研究进展 [J]. 力学进展, 1994, 24(2): 187—205.
- [23] 谢定义. 饱和砂土体液化的若干问题 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 90—98.
- [24] 邵生俊, 谢定义. 饱和砂土的动强度及破坏准则 [J]. 岩土工程学报, 1991, 13(1): 24—33.
- [25] SDS01-79, 土工试验规程 [S].
- [26] SL237-1999, 土工试验规程 [S].
- [27] The Committee on Soil Dynamics of Geotechnical Engineering

Division, ASCE. Definition of terms related to liquefaction [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1979, 104(GT9): 1197—1200.

- [28] Casagrande A. Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earthfills [J]. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, 1936, 23(1): 257—276.
- [29] Castro G. Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1975, 101(6): 551—569.
- [30] Poulos S J, Castro G, France J W. Liquefaction evaluation procedure [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1985, 111(6): 772—791.
- [31] Castro G, Seed R B, Keller T O, et al. Steady-state strength analysis of Lower San Fernando dam slide [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1992, 118(3): 406—427.
- [32] Ishihara K. Liquefaction and flow failure during earthquakes [J]. Geotechnique, 1993, 43(3): 351—415.
- [33] Bazier M H, Dobry R. Residual strength and large-deformation potential of loose silty sands [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1995, 121(12): 896—906.
- [34] Lee K L, Seed H B. Cyclic stress conditions causing liquefaction of sand [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1967, 93(SM1): 47—70.
- [35] 刘汉龙, 余湘娟. 土动力学与岩土地震工程研究进展 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27(1): 6—15.

(收稿日期 2004-09-06 编辑 高建群)

(上接第 22 页)

- [14] 徐士良. FORTRAN 常用算法程序集 [M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 1995. 501—511.
- [15] Al-Sheriadeh M S, Barakat S A, Shawagfeh M S. Application of a decision making analysis to evaluate direct recharging of an unconfined aquifer in Jordan [J]. Water Resources Management, 1999, 13(4): 233—252.
- [16] Srivastava K, Rai S N, Singh R N. Modeling water-table fluctuations in a sloping aquifer with random hydraulic conductivity [J]. Environmental Geology, 2002, 41(5): 520—524.
- [17] Hunt A G. An explicit derivation of an exponential dependence of the hydraulic conductivity on relative saturation [J]. Advances in Water Resources, 2004, 27(2): 197—201.
- [18] Freeze R A. A stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media [J]. Water Resources Research, 1975, 11(5): 725—741.

(收稿日期 2004-05-25 编辑 高建群)

(上接第 45 页)

4 结语

虚拟现实技术是一种全新的信息处理方式,正在被广泛应用于各个领域,它对仿真环境的改善将起重大作用^[3].使用这一技术实现的灌区虚拟现实系统为灌区建设的决策提供形象可靠的依据,为灌区提供了科学的管理手段.目前,全国大型灌区的建设作为国家试点项目,已先后在十几个省市建立试点.灌区虚拟现实系统的建设还有待进一步完善.

参考文献:

- [1] 钟正, 朱庆. 一种基于海量数据库的 DEM 动态可视化方法 [J]. 海洋测绘, 2003, 23(2): 10—19.
- [2] 刘仁义, 刘南. 基于 GIS 技术的淹没区确定方法及虚拟现实表达 [J]. 浙江大学学报, 2002, 29(5): 573—576.
- [3] 张续红, 苏建明, 胡庆夕. 虚拟现实技术在城市规划仿真中的应用 [J]. 计算机仿真, 2003, 20(7): 75—77.

(收稿日期 2004-08-30 编辑 高建群)