

渭河临潼段漫滩沉积物渗透系数分析

葛佳亮^{1,2}, 严婷^{1,2}, 吕敬^{1,2}, 董洁^{1,2}, 柯贤敏^{1,2}

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;)

摘要: 河漫滩沉积物渗透系数空间变异性特征对流域生态环境修复与保护具有重要意义。为研究河漫滩沉积物渗透系数空间变异性特征,采用双环试验法和竖管试验法,分别选取渭河临潼段内6个试验段合计6个非饱和试验点、138个饱和试验点渗透系数进行研究,并通过地统计学法进行分析,发现渭河漫滩非饱和带渗透系数和饱和带渗透系数分别介于1.30~6.08 m/d和0.002~1.763 m/d之间,结果表明:渭河临潼段漫滩沉积物非饱和带渗透系数较大,饱和带渗透系数较小;河漫滩饱和带渗透系数沿河符合正态分布且变异性较强;河漫滩饱和带渗透系数空间相关性较弱,但均具有空间自相关性。研究结果为渭河流域地表水和地下水转换关系研究提供了理论和数据支持。

关键词: 河漫滩; 渗透系数; 空间变异性; 竖管试验法; 双环试验法; 渭河临潼段

中图分类号:TV139.1; P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0201-04

Analysis of floodplain sediments saturated hydraulic conductivity in Lintong section of Weihe river

GE Jialiang^{1,2}, YAN Ting^{1,2}, LÜ Jing^{1,2}, DONG Jie^{1,2}, KE Xianmin^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The spatial variability of the hydraulic conductivity of floodplain sediments is of great significance to the restoration and protection of ecological environment in the basin. In order to study the spatial variability of the hydraulic conductivity of the floodplain sediments, using double loop test method and standpipe test method, we selected 6 unsaturated test sites and 138 saturated test sites in total for the six test sections of the Lintong section of the Weihe River, respectively. All data were analyzed by geographical statistics method. We found that the hydraulic conductivity coefficients of the unsaturated zone and the saturated zone in the Weihe floodplain are between 1.30 m/d – 6.08 m/d and 0.002 m/d – 1.763 m/d, respectively. The results show that: the unsaturated hydraulic conductivity of the floodplain sediments in the Lintong section of the Weihe River is large and the saturated hydraulic conductivity is small; the saturated hydraulic conductivity of the floodplain is consistent with the normal distribution along the river and the variability is strong. The spatial correlation of the saturated hydraulic conductivity of the floodplain is weak, but both have spatial autocorrelation. The results provide theoretical and data support for the study of surface water and groundwater conversion in Weihe River Basin.

Key words: floodplain; hydraulic conductivity; spatial variability; standpipe test method; double ring test method; Lintong section of Weihe River

1 研究背景

渭河是黄河的一级支流^[1]。近年来,渭河河道

泥沙淤积严重,河床抬高,造成了雨季洪水多发的局面^[2]。因此,研究地表水与地下水之间的交互作用是渭河流域生态环境的重要课题。作为水文地质学中的重要参数之一,河漫滩沉积物和河床的渗透系

收稿日期:2017-09-14; 修回日期:2017-10-21

基金项目:国家自然科学基金项目(41072183)

作者简介:葛佳亮(1992-),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为地下水与水环境。

数影响着地表水与地下水之间的转化关系^[3]。

目前,国内外许多学者已进行大量关于沉积物渗透系数的研究工作,集中探讨了其测定方法、分布规律及空间变异性特征等。学者们普遍使用 Hvorslev^[4]提出的竖管试验法及其改进方法^[5-7],这些方法测定沉积物渗透系数时具有较高的实用性及可靠性。同时,很多学者通过研究得出沉积物渗透系数值服从正态分布或对数正态分布,如赵佳莉等^[8]在对滦河下游河床沉积物渗透系数的研究及 CHEN^[9]在对 Platte River 沉积物渗透系数的试验中皆发现渗透系数近似服从正态分布;施小清等^[10]通过对含水层渗透系数空间变异特征的研究表明含水层渗透系数服从对数正态分布,刘文婷等^[11]及束龙仓等^[12]的研究也得出类似结论。此外,在沉积物渗透系数空间变异性方面的研究也取得了一定的进展,如宋进喜等^[13]、来文立等^[14]及赵佳莉^[15]发现河床沉积物垂向渗透系数随深度增加而减小;米海存等^[16]应用地统计学原理分析得出渭河漫滩饱和带垂向渗透系数具有较强的空间变异性;束龙仓等^[17]在美国 Platte River 的研究表明在垂向上河床沉积物的渗透系数具有一定各向异性。可以发现国内外绝大多数学者的研究都集中在河床区域,对漫滩沉积物渗透系数的研究较少,而在洪水多发季节,漫滩沉积物渗透性对地表水与地下水的交互作用有重要的影响^[18]。因此研究河漫滩沉积物渗透系数空间变异性特征,对河流流域生态环境的修复与保护有重要意义。本文在渭河临潼段河漫滩内选取 6 个试验段,采用竖管法和双环法分别测定漫滩饱和带和非饱和带渗透系数,并对数据进行分析,研究漫滩沉积物渗透系数的空间变异性,相关结果可为渭河水资源保护和生态环境的修复提供理论基础。

2 研究区概况及研究方法

2.1 研究区概况

渭河发源于甘肃省定西市渭源县的鸟鼠山,在陕西省渭南市潼关县汇入黄河,干流全长 818 km,总流域面积达 $13.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。渭河陕西段主要经过宝鸡、杨凌、咸阳、西安、渭南 5 个地区,陕西境内全长约 502 km,位于陕西省的中部^[19-20]。本次主要以渭河下游临潼段为试验区段,试验区位于灞河入渭河口到临潼区西口村,即临潼区与高陵县之间($34^\circ 25' 56.55'' \sim 34^\circ 26' 53.70'' \text{N}$, $109^\circ 01' 01.11'' \sim 109^\circ 15' \text{E}$),在该段渭河左右岸漫滩饱和带及非饱和带进行试验。

2.2 研究方法

2.2.1 试验设计 选择平整、有一定高差,植被较少的漫滩和比较平整、没有陡坡的河床段作为试验段。测试段共 6 个,沿河岸自上游向下游布设,试验点沿河岸自上游向下游单排布设,间隔为 5 m。左岸选取 2 个试验段,共布设 44 个饱和带竖管试验点和 2 个非饱和带双环试验点;右岸选取 3 个试验段,共布设 94 个饱和带竖管试验点和 4 个非饱和带双环试验点。其中试验段 W1 试验点分布见图 1。

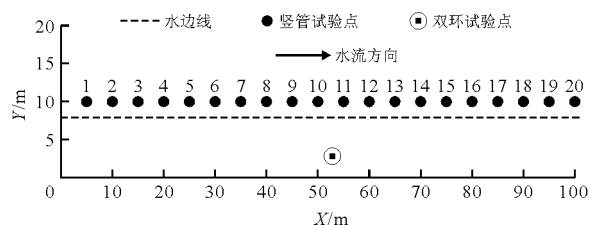


图1 试验段 W1 试验点分布示意图

2.2.2 双环试验法 本文选择潜水埋藏深度大于 5 m 的河漫滩做为试验区,清理地面杂草并布设试坑,试验开始前,在试坑底嵌入两个高 50 cm、直径分别为 0.25 和 0.50 m 的铁环。试验开始后同时向内、外铁环内注水,每个观测期内总注水量为 350 mL,注水时控制内、外环的水位都在 10 cm 处,并记录每注入 350 mL 水所需的时间。开始时渗入量大,观测间隔为 1 min,单位时间渗入水量达到相对稳定后,再继续观测 3 h,结束试验。双环法渗透系数计算公式为^[21]:

$$K = \frac{Q}{I\omega} \quad (1)$$

式中: K 为渗透系数, m/d ; Q 为稳定渗流量, m^3/d ; ω 为渗坑底面积, m^2 ; I 为水力梯度。

2.2.3 竖管试验法 本文选择河床比较平坦、河水较浅处做为试验区,将聚乙烯管直接打入河床沉积物 30 cm 深,并将聚乙烯管中灌满水,放入水位计,试验计时 1 h。河床沉积物垂向渗透系数的计算公式为^[22]:

$$K_v = \frac{L_v}{(t_2 - t_1)} \ln(h_1/h_2) \quad (2)$$

式中: L_v 为聚乙烯管所取沉积物厚度, cm ; h_1 、 h_2 分别是竖管中两个时刻 t_1 和 t_2 所对应的水头值。

将实测竖管法渗水试验和双环渗水试验数据代入公式(2)得到河床沉积物渗透系数。

2.2.4 数据处理 地统计学的基本原理和方法已在许多文献中有详细的描述^[23-24]。不同空间位置上河漫滩饱和带和渗透系数与测试点在空间中的位置有

关,是空间距离的函数。因此,渭河河床沉积物渗透系数可采用变异函数来描述:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

(3)

式中: $\gamma^*(h)$ 为空间距离 h 点的试验变异函数^[25]; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别表示空间位置点 x_i 和 $x_i + h$ 上漫滩饱和渗透系数的实测值($i = 1, 2, \dots, N(h)$)。

运用 GS+9.0 软件通过公式(3)计算各研究区测试点变异函数值,发现采用指数模型(公式 4)对变异函数值进行最优拟合为最佳。

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C(1 - e^{-h/a}) & h > 0 \end{cases}$$

(4)

式中: C_0 为块金常数,代表区域化变量是由非采样间距造成的变异,是由微观结构变化和观测误差所决定的随机变化成分; $C_0 + C$ 值称为总基台值,它的大小反映变量的在测量范围内的最大变异程度,当变异函数 $\gamma(h)$ 达到这个极限值后,变异函数 $\gamma(h)$ 值将不再递增而是在这个值附近上下波动; a 为变程值。

3 结果与分析

双环试验所得渗透系数在 1.30 ~ 6.08 m/d 之间(见表 1),平均值为 3.62 m/d。渗透系数较大,但河两岸渗透系数差别不大,试验点沉积物主要以细砂为主,未见有淤泥质和腐殖质层。

表 1 双环法渗水试验实测渗透系数

位置	点号	渗透系数/(m · d ⁻¹)
左岸	S1	2.71
	S2	6.08
	S3	2.11
右岸	S4	4.90
	S5	1.30
	S6	4.63

表 2 为基于渭河漫滩 138 个竖管试验点的饱和渗透系数经典统计学分析。由表 2 可看出,渭河左岸漫滩沉积物饱和渗透系数为 0.003 ~ 1.376 m/d,右岸饱和渗透系数为 0.002 ~ 1.763 m/d,渗透系数均较小,但左、右岸差别不大。采用 Matlab 软件中的 c 检验方法对实测数据的 K_v 值及 $\ln K_v$ 数据分别进行统计检验分析,发现试验段中除了 W3 与 W5

的 K_v 值正态检验及对数正态检验效果不佳之外,其他试验段均符合正态分布;分别对整个左岸、右岸进行 Matlab 统计检验分析,发现渗透系数在沿河流方向上符合正态分布规律。

一般 $C_v \leq 10\%$ 为弱变异性; $10\% < C_v < 100\%$ 为中等变异性; $C_v \geq 100\%$ 为强变异性^[26]。W2、W3、W5 都处于 50% ~ 100% 之间,属于中等变异性,W1、W4、W6 都大于 100%,属于强变异性,明显可看出河床沉积物渗透系数的变异性较强,左、右岸变异性区别不大。表 2 所给出的统计值仅仅从统计学的角度描述了渗透系数的变化,仅能在一定程度上反映总体情况,要反映河漫滩沉积物饱和和渗透系数在空间上的变化,需进行空间变异结构方面的探讨与分析。

表 2 竖管法渗透系数计算值

位置	点号	K_v 计算值/(m · d ⁻¹)				有效测试点数
		范围	均值	标准差	变异系数 C_v	
左岸	W1	0.028 ~ 1.376	0.181	0.326	1.800	24
	W2	0.003 ~ 0.084	0.018	0.017	0.962	20
	W3	0.002 ~ 0.476	0.137	0.125	0.916	24
右岸	W4	0.042 ~ 1.763	0.274	0.350	1.278	24
	W5	0.009 ~ 1.692	0.196	0.157	0.799	22
	W6	0.028 ~ 0.607	0.391	0.404	1.034	24

4 讨 论

半变异函数是地统计学所特有的,是区域化变量在分隔距离上各样本变异的度量,并被证明是研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性的自然现象的有效工具^[27],因而所测得的渭河河床沉积物渗透系数的空间变异性具有结构性及随机性的特点。对渗透系数进行变异函数拟合(图略),变异函数拟合参数见表 3。

4.1 渗透系数空间变异性程度

从结构性的角度,常用 C 与 $C_0 + C$ 的比值来量化所研究变量的空间相关性,试验段 $C_0/(C_0 + C)$ 值在 0.781 ~ 0.998,根据 Cambardella 等^[28] 所提出的区域化变量的空间相关程度分级标准,6 个试验段 K_v 的 $C/(C_0 + C)$ 比值均大于 0.75,说明 6 个试验段的 K_v 空间变异性主要由随机性因子造成的,空间相关性较弱。

4.2 渗透系数空间变异性尺度

空间变异性与尺度有关,空间变异性分析就必

须要考虑尺度的问题^[29]。变程是一个在地统计学理论分析中的重要参数,其大小反映了区域化变量的空间异质性的尺度或空间自相关的尺度^[30],6个试验段的 K_v 变程值 a 分别为 0.13、7.1、2.8、1.8、0.1、9.0 m, W1 与 W5 的自相关性较差,这与河流沉积物结构因素和随机因素有很大关系,但是所测得渭河河床沉积物渗透系数都具有空间自相关性。

表3 变异函数拟合参数

试验段	理论模型	C_0	$C_0 + C$	$C/(C_0 + C)$	a/m
左岸	W1 指数模型	0.00010	0.09020	0.998	0.13
	W2 指数模型	0.00007	0.00032	0.781	7.1
	W3 指数模型	0.00004	0.01400	0.997	2.8
右岸	W4 指数模型	0.00270	0.11340	0.976	1.8
	W5 指数模型	0.00310	0.02440	0.873	0.1
	W6 指数模型	0.03700	0.20700	0.821	9.0

5 结 论

(1)渭河漫滩沉积物非饱和渗透系数较大,饱和渗透系数较小,这是由于漫滩非饱和带的沉积层中含砂量较大,淤泥质和泥土含量较低,而饱和带试验河段河水流速较缓,河流沉积作用显著,河流对沉积物的冲刷能力较弱,形成不同厚度且层次分明的含淤泥沉积层,淤泥中含有大量的黑色腐殖质,形成了弱透水层。

(2)渭河漫滩沉积物饱和渗透系数在空间上符合正态分布规律,反映样品数据离散程度的变异系数均为中等变异或强变异。

(3)指数模型可以很好地拟合渭河漫滩沉积物饱和渗透系数,渗透系数空间相关性较弱,渭河漫滩沉积物渗透系数均具有空间自相关性,但试验段 W1 与 W5 的自相关性较差。

参考文献:

- [1] 王 珍,宋进喜,段孟辰,等. 渭河陕西段河水水质 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2013,24(3):64-68.
- [2] 郭向东. 渭河中下游河道 2009 年过洪能力分析[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(2):137-141.
- [3] 高 敏. 半干旱地区河床渗透系数空间变异性研究[D]. 西安:长安大学,2012.
- [4] HVORSLEV M J. Time lag and soil permeability in ground water observations, waterways experiment station, corps of engineers[J]. U. S. Army Bulletin, 1951,36(118).
- [5] CHEN Xunhong. Measurement of streambed hydraulic conductivity and its anisotropy[J]. Environmental Geology, 2000, 39(12):1317-1324.
- [6] WANG Wenke, LI Juntong, WANG Wenming, et al. Estimating streambed parameters for a disconnected river[J]. Hydrological Processes, 2014,28(10):3627-3641.
- [7] LANDON M K, RUS D L, HARVEY F E. Comparison of instream methods for measuring hydraulic conductivity in sandy streambeds[J]. Groundwater, 2001, 39(6):870-885.
- [8] 赵佳莉,王文科,王周锋,等. 河床沉积物渗透系数空间变异性研究——以滦河下游为例[J]. 水文地质工程地质,2014,41(3):13-20.
- [9] CHEN Xunhong. Statistical and geostatistical features of streambed hydraulic conductivities in the Platte River, Nebraska[J]. Environmental Geology, 2005, 48(6):693-701.
- [10] 施小清,吴吉春,袁永生. 渗透系数空间变异性研究[J]. 水科学进展,2005,16(2):210-215.
- [11] 刘文婷,朝伦巴根,刘艳伟,等. 地质统计学方法在渗透系数空间变异性研究中的应用[J]. 水利科技与经济, 2010,16(4):364-366.
- [12] 束龙仓,CHEN Xunhong. 美国内布拉斯加州普拉特河河床沉积物渗透系数的现场测定[J]. 水科学进展, 2002,13(5):629-633.
- [13] 宋进喜,CHEN Xunhong,CHENG Cheng,等. 美国内布拉斯加州埃尔克霍恩河河床沉积物渗透系数深度变化特征[J]. 科学通报,2009,54(24):3892-3899.
- [14] 来文立,宋进喜,沈鹏云. 渭河河床沉积物垂向渗透系数深度变化分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2013,43(1):109-114.
- [15] 赵佳莉. 格尔木河河床沉积物渗透系数变异性研究[D]. 西安:长安大学,2014.
- [16] 米海存,CHEN Xunhong,何红曼,等. 渭河漫滩饱和带垂向渗透系数研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(1):62-66.
- [17] 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),2007,37(2):216-220.
- [18] 范晓梅,刘高焕,束龙仓,等. 黄河三角洲沉积环境和沉积物渗透系数的现场实验测定[J]. 水资源与水工程学报,2008,19(5):6-10.
- [19] 米海存,CHEN Xunhong,何红曼,等. 渭河漫滩沉积物渗透性研究[J]. 水文地质工程地质,2014,41(4):19-23.
- [20] 雷江群,黄 强,畅建霞,等. 渭河流域气候要素演变特性分析[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(5):1-5.

(下转第 211 页)

- 类型岸坡渗流场特征[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(5): 56-61+65.
- [2] 陈东辉. 基于渗流场和应力场耦合作用的岸坡稳定性分析[D]. 广州:暨南大学, 2015.
- [3] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. Physics, 1931(1): 318-333.
- [4] TOPP G C, MILLER E E. Hysteretic moisture characteristics and hydraulic conductivities for glass bead media[J]. Soil Science Society of America Journal, 1966, 30(2): 156-162.
- [5] NEUMAN S P. Saturated-unsaturated seepage by finite elements[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1973, 99(12): 2233-2250.
- [6] SCHNELLMANN R, BUSSLINGER M, SCHNEIDER H R, et al. Effect of rising water table in an unsaturated slope[J]. Engineering Geology, 2010, 114(1): 71-83.
- [7] YAN Zongling, WANG Junjie, CHAI Hejun. Influence of water level fluctuation on phreatic line in silty soil model slope[J]. Engineering Geology, 2010, 113(1-4): 90-98.
- [8] 刘博, 李江腾, 王泽伟, 等. 非饱和土渗流特性对库岸边坡稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(2): 515-520.
- [9] 谢新宇, 杨相如, 刘开富, 等. 水位变化对带挡土墙路基稳定性影响[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(6): 1263-1266+1271.
- [10] 张文杰, 詹良通, 凌道盛, 等. 水位升降对库区非饱和土质岸坡稳定性的影响[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(8): 1365-1370+1328.
- [11] 何忠泽, 曾耀, 吕坤, 等. 滑床渗透性对超覆型库岸老滑坡稳定性的影响[J]. 地质科技情报, 2012, 31(2): 112-116.
- [12] 许胜才. 水泥土桩加固边坡变形破坏机理与稳定性研究[D]. 广西:广西大学, 2016.
- [13] 郑晓晶, 殷坤龙. 基于非饱和渗流的水库库岸滑坡稳定性计算[J]. 水文地质工程地质, 2007(2): 29-32.
- [14] 加拿大 GEO-SLOPE 国际有限公司著. 非饱和土体渗流分析软件 SEEP/W 用户指南[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011.

(上接第 204 页)

- [21] 简文星, 许强, 吴韩, 等. 三峡库区黄土坡滑坡非饱和水力参数研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3517-3522.
- [22] CHEN Xunhong. Depth-dependent hydraulic conductivity distribution patterns of a streambed[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(2): 278-287.
- [23] STEWART B A. Advances in soil science: Volume 3 [M]//WEBSTER R. Quantitative spatial analysis of soil in the field, New York:Springer, 1985:1-70.
- [24] ROBERTSON G P, CRUM J R, ELLIS B G. The spatial variability of soil resource following long-term disturbance[J]. Oecologia, 1993, 96(4): 451-456.
- [25] 刘蒙蒙. 泾阳县南塬黄土边坡渗透系数变异性分析[D]. 西安:长安大学, 2015.
- [26] 吕敬, 柯贤敏, 张小筱, 等. 泾阳南塬黄土边坡饱和渗透系数变异性分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 254-257.
- [27] 刘贤赵, 李涛. 渭北旱塬苹果基地土壤水分空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(S1): 33-38.
- [28] CAMBARDELLA C A, MOORMAN T B, PARKIN T B, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [29] 曹伟, 魏光辉, 庄亮亮. 基于地统计学的田间尺度下土壤盐分离子空间变异研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 148-151.
- [30] 王波, 毛任钊, 曹健, 等. 海河低平原区农田重金属含量的空间变异性——以河北省肥乡县为例[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4082-4090.