泾阳南塬黄土边坡饱和渗透系数变异性分析

吕 敬[1,2], 柯贤敏[1,2], 张小筱[3], 李秀娟[1,2]

(1.长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054;
2.旱区地下水与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3.陕西省土地工程建设集团, 陕西 西安 710054)

摘 要:[目的] 研究泾阳县南塬耕植土下部黄土层饱和渗透系数空间变异性特征,为研究水的渗透对黄土滑坡的影响提供依据。[方法] 通过室内变水头渗透试验测定泾阳县南塬 54 个测试点的垂直饱和渗透系数和水平饱和渗透系数,并用传统统计学和地统计学方法进行分析。[结果] 探槽取样区的饱和渗透系数在 10^{-2}～10 m/d 范围之内,平硐取样区的渗透系数明显小于探槽渗透系数值,在 10^{-4}～1 m/d 范围之间。探槽垂直方向空间相关程度中等,变程为 5.05,水平方向空间相关程度强,变程为 3.50;平硐垂直方向空间相关度中等,变程为 17.46,水平方向空间相关程度弱,变程为 16.00。[结论] 黄土边坡饱和渗透系数的空间变异性较强。

关键词:泾阳县;黄土;渗透系数;变异性;地统计学

文献标识码:A **文章编号**:1000-288X(2017)03-0254-04 **中图分类号**:P641, TV443

文献参数: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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.043; Lü Jing, Ke Xianmin, Zhang Xiaoxiao, et al. Variability of saturated permeability coefficient of loess slopes in South Jingyang tableland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017,37(3):254-257. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.043

Variability of Saturated Permeability Coefficient of Loess Slopes in South Jingyang Tableland

LÜ Jing[1,2], KE Xianmin[1,2], ZHANG Xiaoxiao[3], LI Xiujuan[1,2]

(1. *School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*;
2. *Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 3. *Shanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*)

Abstract: [Objective] The spatial variability of saturated permeability coefficient of lower layer of cultivated soil was researched to understand the influence of water infiltration on loess landslide in South Jingyang Plateau. [Methods] The horizontal and vertical saturated permeability coefficient of 54 loess samples were measured from the variable head permeability test and analysed using traditional statistics and geostatistics methods. [Results] The saturated permeability coefficient of the trench sampling area was 0.01～10 m/d and the permeability coefficient of the adit sampling area was smaller than that of the trench area, with its range of 0.0001 to 1 m/d. The spatial correlation degree of the vertical direction of the trench sampling area is medium, and the variation range is 5.05; horizontal spatial correlation degree is strong, change range is 3.50. The spatial correlation degree of the vertical direction of the adit is medium, and the variation range is 17.46. For horizontal direction, its correlation is weak with a range of 16.00. [Conclusion] The variability of saturated permeability coefficient in loess slope is larger.

Keywords: **Jingyang County; loess; permeability coefficient; variability; geostatistics**

黄土滑坡,作为一种地质灾害,给人民群众的生命财产、国家的经济建设带来巨大的损失[1]。在逐渐认识到降水和地下水的多重因素对黄土滑坡的影响下,中国相关学者在国外学者对非饱和土的研究基础上[2-3],对黄土渗透系数的变化规律和空间变异性进行研究,这对滑坡的防治具有重要意义[4]。目前在渗

收稿日期:2016-10-12 **修回日期**:2016-10-24
资助项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)"黄土重大灾害成灾机理及灾害链演化规律"(2014CB744702)
第一作者:吕敬(1991—)男(汉族)河北省柏乡县人,硕士研究生,主要从事水文地质、地下水模拟研究。E-mail:1923342377@qq.com。

透系数的空间变异性研究上应用较为成熟的是随机理论[5]和统计方法,随着不确定性统计学和新型地统计学方法的发展,地统计学得到广泛认可与应用[6]。刘春明等[7]利用地统计学方法研究了黄土区坡面表层土壤饱和渗透系数的空间分布特征。Wang Y 等[8]利用地统计学方法对黄土高原 620 000 km^2 的范围 382 个土样的饱和渗透系数进行空间变异性分析,由于对耕植土下部的黄土层渗透系数的空间变异性研究较少,本文将着重研究该层黄土层饱和渗透的空间变异性。陕西省泾阳县南部黄土台塬为黄土滑坡多发地段[9]。以泾阳县南源(泾河右岸)滑坡为研究对象,通过野外取样,室内变水头渗透试验来测定黄土边坡的饱和渗透系数,并对数据进行分析,探索黄土边坡饱和渗透系数空间变异性,为进一步研究水的渗透对黄土滑坡的影响提供依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究地点位于泾阳县南部的黄土台塬塬边地带,泾河下游的南岸。塬面海拔 430～500 m,面积达 180 km^2。塬面地形较平坦,地势西北高,东南低;塬边为陡崖、陡坎并与泾河的河床、河漫滩相连,边坡只出露上更新统马兰黄土(L_1)、第一层古土壤(S_1)、中更新统离石黄土(L_2)3 种地层。该研究区属暖温带大陆性季风气候,多年平均降水量约为 536.6 mm,年平均气温在 13 ℃左右。南塬边坡由于不断受到泾河侧蚀,使得南岸阶地逐渐缺失,形成陡坡,坡度一般在 40～70°。自 1976 年后,地下水补给量增加,地下水位上升,斜坡失稳,地质灾害频发[10]。

1.2　研究方法

1.2.1　*样品采集与实验设计*　本次研究主要在黄土塬边边坡布设一个探槽采样区(用以研究不同土层)和一个平硐采样区(用以研究同一土层)。探槽采样区位于曾发生过黄土滑坡的滑坡后壁(34°30′11″N,108°45′36″E,海拔 450 m),去除边坡表层的风化土,沿坡顶向下挖一个 1 m×1 m 的探槽,由顶到底每间隔 1m 取水平方向和垂直方向土样各一个,平硐位于寨头村的黄土滑坡后壁的离石黄土层,从滑坡坡面水平向内开凿,命名为 U 硐(34°30′12″N, 108°45′35″E,海拔 424 m),深度为 35 m。沿平硐底部边缘由洞口向内每隔 1 m 分别取水平方向和垂直方向土样各一个。

用变水头方法来测定所取土样的饱和渗透系数,计算公式为:

$$K=\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \tag{1}$$

式中:a——测压管横截面积(cm^2);L——试样厚度(cm);A——试样横截面积(cm^2);K——试样饱和渗透系数(cm/s);t_1,t_2,h_1,h_2——试验起止时间与起止水头(s,s,cm,cm)。每个样点 6 次重复,取平均值作为该样点饱和渗透系数。

1.2.2　*地统计学方法*　地统计学原理与方法已在许多文献中有详尽的描述[11-12],Matheron[13]将变异函数定义为:

$$\gamma(h)=1/2E[Z(x)-Z(x+h)]^2 \tag{2}$$

式中:$\gamma(h)$——变异函数;$Z(x)$和 $Z(x+h)$——变量 Z 在点 x 和$(x+h)$处的值;在区域化变量黄土饱和渗透系数 $Z(x)$满足平稳假设或本征假设的条件下,计算式为:

$$\gamma^*(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-Z(x_i+h)]^2 \tag{3}$$

式中:$Z(x_i)$,$Z(x_i+h)$——空间位置 x_i 和 x_i+h 上黄土饱和渗透系数的实测值$[i=1,2,\cdots,N(h)]$;$\gamma^*(h)$——空间距离 h 点的试验变异函数[14],变异函数可用变异曲线来表示,当 $h=0$ 时,曲线有一个正的截距,称其为块金值用 C_0 表示,在水平方向上,它反映同一水平面内区域化变量随机性的大小;在垂直方向上,它反映同一竖直平面内区域化变量的随机性。$\gamma^*(h)$随 h 的增大而增大,但当增大到一定程度时,将不再增加,此时的 $\gamma^*(h)$称为基台值,用 C_0+C 表示,C 为结构方差,此时的 h 定义为变程 A[15]。当 $h\leqslant A$时,任意两点间观测值均具有空间相关性,反之,则不具有相关性。

1.2.3　*数据处理*　地统计学方法应用时,通常要求原始数据符合正态分布;对不符合正态分布的原始数据采取对数转换,使其符合或基本符合正态分布[15],在 SPSS 软件支持下,利用 Jarque-Bera 检验方法对研究对象进行正态分布检验,并用 Q—Q 图证明其正态分布的一致性,然后进行变差函数拟合[16],利用 GIS 软件与 MATLAB 软件进行函数拟合,并用残差(RSS)和决定系数(r^2)来确定最优拟合模型,即当拟合模型的残差最小,决定系数最大,则此模型为最优拟合。

2　结果与分析

2.1　传统统计学描述

表 1 是基于 54 个采样点的探槽和平硐垂直及水平饱和渗透系数的经典统计描述,在去除异常值[17]后,从测试结果可见,探槽的垂直渗透系数范围在

0.094 7～1.391 9 m/d,水平渗透系数范围在 0.025 1～1.533 6 m/d;平硐的垂直渗透系数范围在 0.000 1～0.160 9 m/d,水平渗透系数范围为 0.003 9～0.226 6 m/d。利用 Jarque-Bera 方法对样品饱和渗透系数进行正态分布检验,可以发现除 U 硐的 K_v 既不服从正态分布,也不服从对数正态分布外,均服从对数正态分布,而用 Q－Q 图对各采样点进行验证,可以看出其均服从对数正态分布;从而得出各采样点饱和渗透系数均服从对数正态分布的结论。

样品符合正态分布时,从变异系数来看,一般认为,$C_v \leqslant 10\%$ 为弱变异性;$10\% < C_v < 100\%$ 为中等变异性;$C_v \geqslant 100\%$ 为强变异性[18]。所有取样区渗透系数的变差系数都在 1 左右(0.891 5～1.053 2),说明黄土的渗透系数具有较强的变异性。

表 1 黄土饱和渗透系数统计分析

取样区	取样方向	平均值	标准差	最小值	最大值	变异系数	偏度系数	峰度系数
探槽	K_v	0.410 8	0.366 3	0.094 7	1.391 9	0.891 5	1.622 8	2.217 9
	K_h	0.405 8	0.392 3	0.025 1	1.533 6	0.966 7	1.691 0	2.767 3
平硐	K_v	0.033 1	0.034 8	0.000 1	0.160 9	1.053 2	1.884 5	4.492 2
	K_h	0.054 6	0.052 5	0.003 9	0.226 6	0.961 1	1.841 4	3.240 0

2.2 地统计学变差函数结构分析

结构分析主要目的是建立一个最优变异函数的理论模型,定量地描述区域化变量的随机性和结构性,并对变量背景和变异函数理论模型进行专业分析和解释[19],表 2 是样品变异函数的理论模型及相关参数,图 1 是样品变异函数曲线拟合情况。

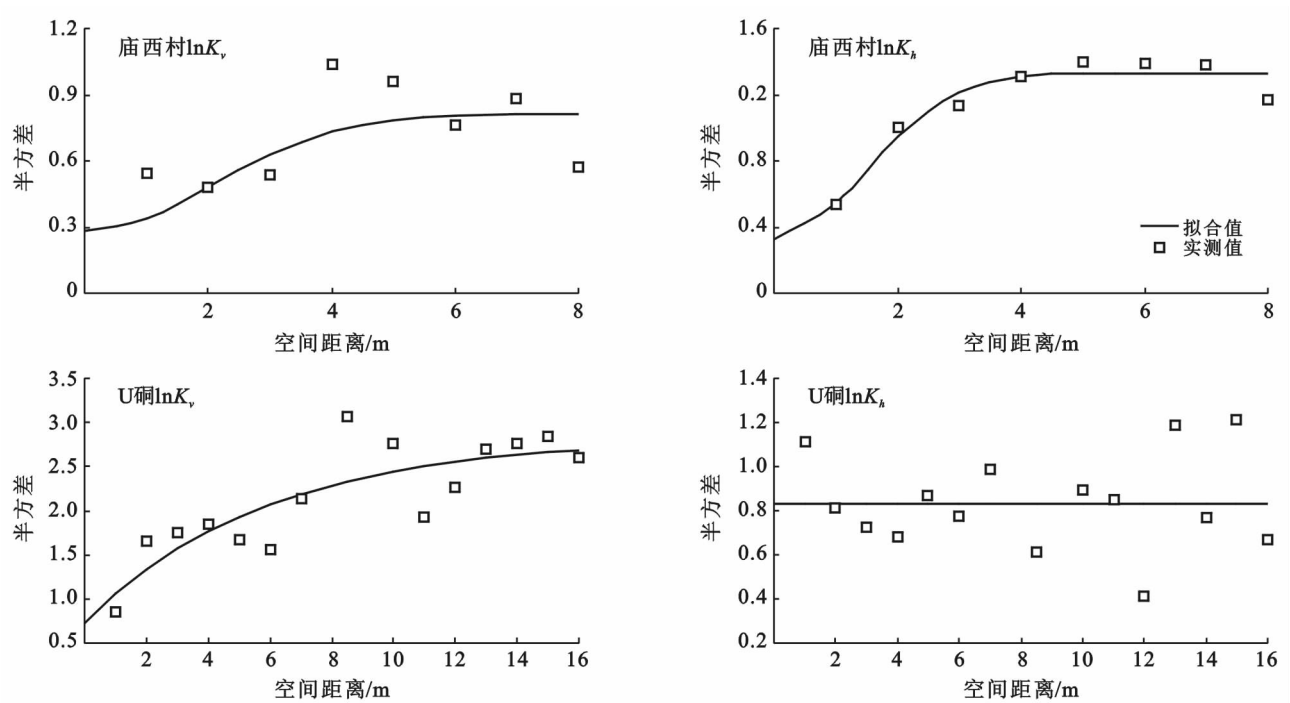


图 1 探槽、平硐饱和渗透系数对数值变异函数分析

表 2 探槽、平硐取样点渗透系数对数值的变异函数拟合参数

取样区	lnK	最佳模型	C_0	C_0+C	$C_0/(C_0+C)$	A/m
探槽	$\ln K_v$	高斯	0.281	0.815	34.48	5.05
	$\ln K_h$	高斯	0.326	1.326	24.59	3.50
U 硐	$\ln K_v$	指数	0.727	2.821	25.77	17.46
	$\ln K_h$	线性	0.833	0.833	100.00	16.00

2.2.1 空间变异程度 一些学者认为空间变异性主要由随机部分和自相关部分组成的[20]。基台值 C_0+C 和块金值 C_0 均可描述空间变异程度,C_0+C 表示饱和渗透系数在空间上的最大变异,它的值越大,总空间变异程度就越高。探槽取样区中水平渗透系数对数值的(C_0+C)最大为 1.326,平硐取样区中垂直渗透系数对数值的(C_0+C)最大为 2.821。C_0 是随机部分的空间变异性,较大的 C_0 值表明在较小的尺度(<1 m)上的某种过程是不可忽视的。引起块金效应的因素主要有两个:一是来源于饱和渗透系数在小于 1 m 尺度上所具有的内部变异;二是来源于抽样分析的误差[19],探槽和平硐中,水平饱和渗透系数对数值(探槽为 0.326 平硐为 0.833)均大于垂直饱和渗透

系数对数值。$C_0/(C_0+C)$可以比较不同区域化变量之间的空间相关程度的大小,根据的区域化变量空间相关程度分级标准,探槽垂直方向饱和渗透系数对数值的 $C_0/(C_0+C)$介于 25%～75%,空间相关程度中等,水平方向 $C_0/(C_0+C)<25\%$,空间相关程度强,即水平渗透系数的空间相关性要强于垂直渗透系数的相关性。平硐垂直方向饱和渗透系数对数值的 $C_0/(C_0+C)$介于 25%～75%,空间相关度中等,水平方向 $C_0/(C_0+C)=1$ 空间相关程度弱,即垂直渗透系数的空间相关性要强于水平渗透系数。

2.2.2　空间变异尺度　空间变异性与尺度有关,空间异质性分析就必须考虑尺度的问题。变程是地统计学理论模型分析中的一个重要参数,其大小反映了区域化变量空间异质性的尺度或空间自相关尺度[15]。如表 2 和图 1 所示,探槽处垂直渗透系数对数的变程 A 为 5.05,大于水平渗透系数,即黄土的垂直饱和渗透系数均一性强于水平;平硐处垂直渗透系数对数变程 A 为 17.46,大于水平渗透系数,即黄土的垂直饱和渗透系数均一性强于水平。

3　讨论与结论

(1) 去除异常值后,黄土的饱和渗透系数基本服从对数正态分布,分布较为分散,变异程度较大。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。

(2) 在该采样尺度下,高斯模型更适合拟合该地区不同黄土层饱和渗透系数,指数模型更适合拟合该地区同一黄土层垂直方向饱和渗透系数,线性模型更适合拟合该黄土层水平方向饱和渗透系数。不同土层中,水平渗透系数的空间相关性要强于垂直渗透系数的相关性;同一土层中,垂直渗透系数的空间相关性要强于水平渗透系数。黄土的垂直饱和渗透系数均一性强于水平。

总之,黄土边坡饱和渗透系数的空间变异性较强,通过地统计学方法,分析耕植土下黄土的空间变异性,可以充分了解该地黄土的透水性分布情况,而由于渗透系数的差异,水在黄土中下渗,会在渗透系数较小的土层上方积累,造成土体水分分布不均,又由于水沿黄土中的裂隙下渗,至垂直下渗面与水平隔水面相通时,形成滑动面,容易发生滑坡。因此,这对研究黄土滑坡的诱发机理有一定指示作用。

[参 考 文 献]

[1] 胡广涛. 滑坡动力学[M]. 北京:地质出版社,1995.

[2] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.

[3] Wagner B, Tarnawski V R, Hennings V, et al. Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set[J]. Geoderma, 2001,102(3):275-297.

[4] 赵景波,邵天杰,牛俊杰. 西安白鹿塬黄土渗透性与含水条件[J]. 地理研究,2009,28(5):1188-1196.

[5] Mantoglou A. A theoretical approach for modeling unsaturated flow in spatially variable soils: Effective flow models in finite domains and nonstationarity[J]. Water Resources Research, 1992,28(1):251-267.

[6] 郭怀成,周丰,刀谓. 地统计方法学研究进展[J]. 地理研究,2008,27(5):1191-1202.

[7] 刘春利,邵明安. 黄土高原坡地表层土壤饱和导水率和水分含量空间变异特征[J]. 中国水土保持科学,2009,7(1):13-18.

[8] Wang Yunqiang, Shao Ming'an, Liu Zhipeng, et al. Regional-scale variation and distribution patterns of soil saturated hydraulic conductivities in surface and subsurface layers in the loessial soils of China[J]. Journal of Hydrology, 2013,487(2):13-23.

[9] 雷祥义. 陕西泾阳南塬黄土滑坡灾害与引水灌溉的关系[J]. 工程地质学报,1995,3(1):56-64.

[10] 王德耀,杜忠潮,张满社. 陕西省泾阳南塬崩塌、滑坡地质灾害及成因分析[J]. 水土保持通报,2004,24(4):34-37.

[11] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field[M] // Stewart B A, Advances in Soil Science. Springer New York, 1985:1-70.

[12] Robertson G P, Crum J R, Ellis B G. The spatial variability of soil resources following long-term disturbance [J]. Oecologia, 1993, 96(4):451-456.

[13] Matheron G. Principles of geostatistics[J]. Economic Geology, 1963,58(8):1246-1266.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1999.

[17] 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.

[18] 雷志栋,杨诗秀,许志荣. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报,1985,9(9):10-21.

[19] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1999:35-98.

[20] Li H R, Reynolds J F. On definition and quantification of heterogeneity[J]. Oikos, 1995,73(2):280-284.