

# 基于GPS与GE的土壤水力参数空间变异采样间距确定\*

王卫华<sup>1</sup> 王全九<sup>2,3</sup>

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为在土壤分析研究时, 制定工作量少、试验设计经济合理, 同时采样点具备代表性的野外采样方案, 采用GPS与Google Earth相结合的方法, 在陕西省泾惠渠灌区研究了土壤水力参数区域尺度的空间变异性, 结果表明: 土壤饱和含水率与饱和导水率在该区域尺度下属于中等变异, 且两者均具有较强的空间依赖性; 饱和含水率的最佳拟合模型为球形模型, 土壤饱和导水率的最佳拟合模型为指数型; 推荐两者的采样间距分别为2.38 km和7.14 km。

**关键词:** 土壤水力参数 空间变异 采样间距 流域尺度 GPS 谷歌地球

**中图分类号:** S152.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)03-0097-04

## 引言

土壤水分是植物生长必不可少的重要元素, 亦是一切生化反应的介质、土壤养分传输的载体。土壤水分运动的过程不仅涉及水分有效性, 而且控制着土壤中各种物质的传输与转化。因此, 土壤水力参数直接决定土壤水分运动、分布及其有效性<sup>[1]</sup>。

由于土壤水分运动受到土壤质地、容重、结构、含水率、有机质含量等因素的影响<sup>[2]</sup>, 因此, 土壤水力参数也受到这些因素的强烈影响。同时, 由于这些因素与成土过程、农业生产和气候因素有关, 因而土壤水力参数存在显著的空间变异性, 对确定一定范围内土壤水力参数造成困难。世界各国学者针对土壤水力参数的统计分布规律开展了关于其空间变异特征的相关研究, 大量野外实测数据表明, 饱和导水率服从对数正态分布, 但也有极少数的试验结果表明, 饱和导水率服从正态分布<sup>[3]</sup>。还有些学者研究了导水率和水分特征曲线中参数的空间分布特征<sup>[4]</sup>, 利用自相关函数获得相关距离, 描述各参数的空间变异特征, 结果表明随着土层深度的增加, 相关距离减小。同时也有相关研究涉及土壤类型、土地利用方式、测量方法以及采样间距对土壤水力参数空间变异性的影响<sup>[5]</sup>。

国内外研究者利用GPS和Google Earth(谷歌地球, 以下简称GE)相结合的方法应用在工程勘测中, 优化路线; 或应用在交通、物流监控方面, 实时监

控<sup>[6-10]</sup>。但此方法在农业工程方面应用极少, 关于这方面的研究鲜为报道。本文拟采用GPS和GE相结合的方法, 在土壤分析研究工作中, 制定工作量少、试验设计经济合理, 同时采样点具备代表性的野外采样方案。试验设计在陕西省泾惠渠灌区麦田采样, 实测土壤水力参数, 根据实测数据间的相关关系, 建立预测模型, 进而估测未知点的土壤水力特性, 利用空间克里格插值法(Ordinary Kriging)来描述土壤水力参数区域尺度空间分布特征, 旨在揭示基于此种方法如何确定采样间距。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

泾惠渠灌区位于陕西省关中平原中部, 地理坐标为东经108°34'34"至109°21'35", 北纬34°25'20"至34°41'40", 灌区西、南、东三面分别有泾河、渭河、石川河环绕, 北邻黄土台塬, 清峪河自灌区北部西向东穿过, 构成了一个完整的水文地质单元, 此外地面和地下径流排泄条件好, 灌区总面积1 180 km<sup>2</sup>, 南北宽约20 km, 东西长约70 km; 总体海拔高度350~450 m, 地面坡降一般为3.33%~1.66%。多年平均降水量为512 mm, 蒸发量1 212 mm, 年平均气温13.6℃, 最高气温42℃(1966年6月21日), 最低气温-24℃(1955年1月10日)。

### 1.2 谷歌地球介绍

GE是一款于2005年正式向全球推出的由

收稿日期: 2013-12-04 修回日期: 2014-01-04

\* 国家自然科学基金资助项目(51179150)和国家自然科学基金重点资助项目(91025018)

作者简介: 王卫华, 博士生, 主要从事土壤物理性质研究, E-mail: wangweihua1220@163.com

通讯作者: 王全九, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: wquanjiu@163.com

Google 公司设计并开发的虚拟地球软件。GE 将卫星照片、航空照相以及 GIS 软件分析整合后的图像布置在一个地球的三维模型上<sup>[11-12]</sup>。GE 具有较为先进的技术以及多源完备的数据资料,是当前最流行的数字地球平台,因而得到了研究者的广泛关注<sup>[13-14]</sup>。

### 1.3 确定采样点

目前,土壤养分采样的方法还是网格化均匀采样为主,但有时也采用主观判断采样、简单随机采样、规则网格采样、分区采样以及混合采样等<sup>[15]</sup>;王云强提出在网格布置的基础之上加密采样<sup>[16]</sup>。随着 GIS 技术的完善和成熟。在土壤样品的选取时候,往往利用手持式 GPS 记录的测点经纬度。

在试验设计中,应充分考虑研究区域的实际情况,利用 GE 预先确定采样点,在遥感影像的帮助下,消除采样点盲区,再将 GE 预先确定的采样点导入 GPS 中,取样时依靠 GPS 寻找兴趣点(预先确定的采样点)。最后,将实测数据导入到 ArcGIS 中进行分析。此方法保证了区域尺度下土壤采样点步长的准确性。在 GPS 和 GE 结合使用的时候涉及到多个文件的相互转换,详见图 1。

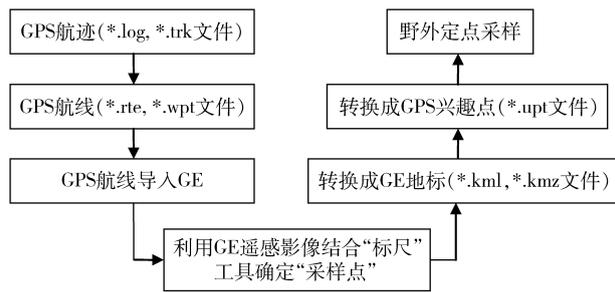


图 1 GPS 和 GE 结合使用时文件相互转换的流程图

Fig. 1 Flow chart of document transformation for the combination of GPS and GE

### 1.4 取样与测量方法

本研究选取的区域位于灌区以内,测点均为小麦田。在流域范围以 2.5 km 的采样间距布设测点,除去盲点外,共布置了 212 个观测点,图 2 为取样测点布置图。依靠 GPS 寻找预先确定的采样点,记录各采样点的经纬度,将各采样点的数据格式转换为 ArcGIS 识别与分析的 .shp 格式<sup>[17-18]</sup>,同时录入采样点土壤水力参数的信息后,即可用于研究区的相关变异分析。

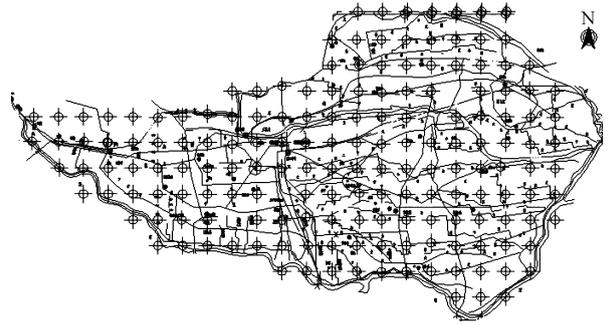


图 2 取样布点示意图(2.5 km × 2.5 km)

Fig. 2 Sketch map of sampling sites(2.5 km × 2.5 km)

利用盘式入渗仪测定饱和导水率(参见文献[19],此处不再赘述。采集样本为地表 0 ~ 10 cm 土样,通过干燥法测量土壤含水率。

### 1.5 数据分析与处理

利用 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析,以空间变异理论为基础,利用 ArcGIS 软件里的地统计模块(Geostatistical analyst),采用空间克里格插值法,绘制土壤水力参数的空间变异分布图<sup>[18,20]</sup>。克里格插值法详见文献[19],此处不再赘述。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水力参数统计特征值

变异程度由变异系数  $C_V$  判断: $C_V \leq 10\%$  属于弱变异性; $10\% < C_V < 100\%$  为中等变异性; $C_V \geq 100\%$  属于强变异性<sup>[18,20]</sup>。土壤水力参数描述性统计分析见表 1。

采用地统计学分析的前提要求就是所有变量服从正态分布,即变量的大小分布符合自然状态。而土壤饱和导水率服从对数正态分布<sup>[3]</sup>,因此对其取自然对数。通过表 1 中偏度、峰度以及 Kolmogorov-Smirnov 法(K-S 检验)进行正态检验( $p = 0.05$ ),亦能看出土壤饱和含水率以及经过对数处理后的饱和导水率属于近似正态分布,在该区域尺度下属于中等变异。

### 2.2 土壤水力参数空间分布特征

将各采样点土壤水力参数的实测数据录入地理信息系统 ArcGIS 软件,数据包括采样点对应的地理坐标经纬度、土壤饱和含水率、饱和导水率等。在地统计模块的运行环境下,拟合得到土壤水力参数的变异函数值,详见表 2。采用变异函数理论模型拟合的方法,推荐其拟合最优值,即可得到结果:饱和

表 1 土壤水力参数描述性统计分析

Tab. 1 Descriptive statistics of soil hydraulic parameters

参数	样本数	平均值	标准差	变异系数	偏度*	峰度	K-S 检验**
饱和含水率/%	212	35.620	5.080	0.143	-0.197	-0.238	0.948
饱和导水率/( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	212	0.005	0.002	0.433	-0.710	-0.755	1.164

\* 偏度值由  $2 \times (6/n)^{0.5}$  得出,其中  $n$  为样本数<sup>[21]</sup>; \*\* K-S 检验高斯分布数值由  $(1.36/n)^{0.5}$  得出<sup>[22]</sup>。

含水率的最佳拟合模型为球形模型；土壤饱和和导水率的最佳拟合模型为指数型。由表 2 可见，2 个变异函数的残差平方和 (RSS) 均很小，接近 0，且决定

系数  $R^2$  均大于 0.8，说明上述理论关系模型能够较好地描述试验数组的变异函数，并且反映理论变异函数与试验数组的变异函数间的关系。

表 2 土壤水力参数变异函数理论模型及其参数

Tab. 2 Parameters of theoretical variogram models for soil hydraulic parameters

参数	模型	块金值 $C_0$	基台值 $C_0 + C$	空间自相关 $C / (C_0 + C)$	变程/km $A_0$	决定系数 $R^2$	残差	分维数 $D$
饱和含水率/%	球形	1.79	25.55	0.93	2.38	0.873	$1.95 \times 10^{-2}$	1.971
饱和和导水率/( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	指数	$2.30 \times 10^{-2}$	25.45	0.999	2.38	0.874	$4.11 \times 10^{-5}$	1.976

表 2 显示土壤水力参数的分维数 ( $D$ ) 均大于 1.9，说明该地区土壤水力参数的空间异质性较强；饱和含水率与土壤饱和和导水率的空间自相关  $C / (C_0 + C)$  均在 0.85 以上，说明由自相关部分引起的空间异质性占总体空间变异性的比重较大，其中空间变异引发的主要因素有地形、气候、土壤母质等非人为因素 (空间自相关部分)<sup>[19]</sup>。也有的研究者认为可以利用空间自相关的大小来判定系统内变量空间相关性程度，指出当  $C / (C + C_0)$  比值大于 75%、25% ~ 75%、小于 25% 时，分别表明变量具有较强、中等、较弱的空间依赖性<sup>[18]</sup>。本文研究结果表明，饱和含水率与土壤饱和和导水率在较大程度上对空间存在依赖。

以最大相关距离作为确定采样间距的参考<sup>[19]</sup>。由表 2 可见，球形模型为饱和含水率的最优拟合模型，变程作为采样间距的推荐参考值，为 2.38 km，指数型模型为土壤饱和和导水率的最优拟合模型，推荐 3 倍变程作为采样间距<sup>[19]</sup>，大约为 7.14 km。同时各水力参数的最大相关距离都没有超出滞后距离 (30.23 km) 的范围，符合逻辑。由此可见，试验设计 2.5 km 的采样间距是比较合理的，且符合空间变异分析的采样要求。

### 2.3 Kriging 插值结果

在 ArcGIS 软件统计模块的运行环境下，以空间变异理论为建模指导思想，构建半方差函数模型 (图 3)，普通克里格法内插取最优值，绘制土壤水力参数的空间变异分布图 (图 4)。

总体上看，土壤水力参数在空间上差异较大，在空间布局上呈斑块状不规则分布。饱和含水率与饱和和导水率呈现出不同的分布格局，但在各自斑块内部的空间连续性均较好。从图 4 中可以看出，土壤含水率高的测点对应的土壤饱和和导水率数值相对较高，在地区分布上具有一定的一致性，这归因于该测点的土壤空隙率较高的缘故。

### 3 结束语

采用 GPS 与 GE 相结合的方法，在区域尺度下

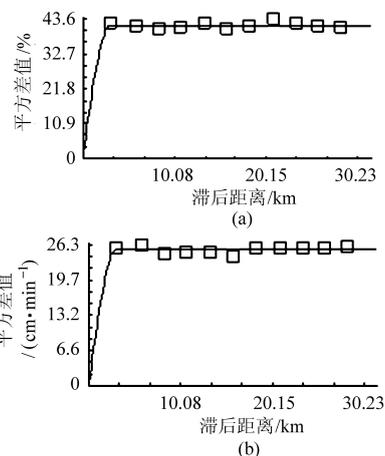


图 3 土壤水力参数的半方差图

Fig. 3 Frequency of soil hydraulic parameters

(a) 饱和含水率 (b) 饱和和导水率

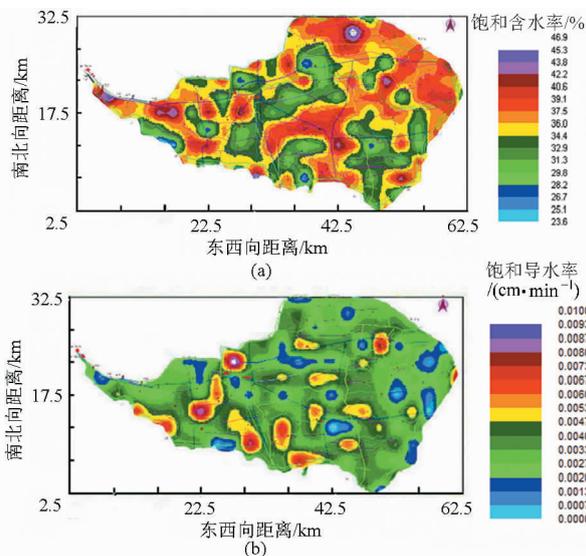


图 4 泾惠渠灌区麦田土壤水力参数的空间插值分布图

Fig. 4 Spatial interpolation distribution map of soil hydraulic parameters in Jinghui irrigation district

(a) 饱和含水率 (b) 饱和和导水率

研究了土壤水力参数的空间变异性，结果表明：土壤饱和含水率与饱和和导水率在该区域尺度下属于中等变异，且两者均具有较强的空间依赖性；饱和含水率的最佳拟合模型为球形模型，土壤饱和和导水率的最佳拟合模型为指数型；推荐两者的采样间距分别为

2.38 km 和 7.14 km。通过对该地区土壤水力特性空间变异性的研究可以及时了解该地区土壤水分分布状况,利用此方法实现了土壤水力参数的空间变异特征在复杂程度上的定量化研究。

### 参 考 文 献

- 1 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- 2 Dohnal M, Dusek J, Vogel T. Improving hydraulic conductivity estimates from Minidisk Infiltrometer measurements for soils with wide pore-size distributions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(3): 804-811.
- 3 Hu W, Shao M, Wang Q, et al. Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses[J]. Geoderma, 2009, 149(3): 355-366.
- 4 郑纪勇,邵明安,张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报,2004,18(3): 53-56.  
Zheng Jiyong, Shao Ming'an, Zhang Xingchang. Spatial variation of surface soil's bulk density and saturated hydraulic conductivity on slope in loess region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3): 53-56. (in Chinese)
- 5 郭德亮,樊军,米美霞. 黑河中游绿洲区不同土地利用类型表层土壤水分空间变异的尺度效应[J]. 应用生态学报,2013,24(5): 1199-1208.  
Guo Deliang, Fan Jun, Mi Meixia. Scale-dependency of spatial variability of surface soil moisture under different land use types in Heihe Oasis, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(5): 1199-1208. (in Chinese)
- 6 张思祥,汤涛,康东升,等. 手持GPS和Google Earth软件在线路选线中的应用[J]. 电力建设,2008,29(5): 37-39.  
Zhang Sixiang, Tang Tao, Kang Dongsheng, et al. Application of hand-hold GPS and Google Earth software in transmission line routing[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(5): 37-39. (in Chinese)
- 7 李磊. 手持GPS与Google Earth联机后在线性工程踏勘中的应用[J]. 长江科学院院报,2012,29(4): 64-66.  
Li Lei. Application of the connection of handheld GPS and Google Earth online to the reconnaissance for linear projects[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(4): 64-66. (in Chinese)
- 8 Sun E, Nieto A, Li Z. GPS and Google Earth based 3D assisted driving system for trucks in surface mines[J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(1): 138-142.
- 9 张全志,刘丙午,李俊韬. 基于Google Earth的物流配送监控系统[J]. 物流技术,2009(11): 67.  
Zhang Quanzhi, Liu Bingwu, Li Juntao. Physical distribution monitoring system based on Google Earth[J]. Logistics Technology, 2009(11): 67. (in Chinese)
- 10 陈修治,陈燕乔,苏泳娴. 基于谷歌地球和GPS的物品定位跟踪系统[J]. 计算机工程与设计,2011,32(9): 3014-3018.  
Chen Xiuzhi, Chen Yanqiao, Su Yongxian. Objects location and tracking system based on Google Earth and GPS[J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(9): 3014-3018. (in Chinese)
- 11 Bahman Eghball, James S Schepers. Spatial and temporal variability of soil nitrate and corn yield[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(2): 339-346.
- 12 罗文刚,苗中科. Google Earth在地震勘探中的应用可行性探讨[J]. 工程地球物理学报,2011,8(3): 269-273.  
Luo Wengang, Miao Zhongke. The application of Google Earth to seismic exploration[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2011, 8(3): 269-273. (in Chinese)
- 13 Juang K W, Liou D Y, Lee D Y. Site-specific phosphorus application based on the Kriging fertilizer-phosphorus availability index of soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(4): 1248-1255.
- 14 王延朝,张成娟,常禹,等. 浅谈Google Earth的应用[J]. 科技资讯,2010(27): 7-8.
- 15 李梅,张学雷,武继承. GIS支持下豫东地区土壤野外采样布点方法探索[J]. 土壤,2011,43(3): 459-465.  
Li Mei, Zhang Xuelei, Wu Jicheng. Sampling point arrangement based on GIS in eastern henan province[J]. Soils, 2011, 43(3): 459-465. (in Chinese)
- 16 王云强. 黄土高原地区土壤干层的空间分布与影响因素[D]. 北京:中国科学院研究生院,2010.
- 17 Nielsen D R, Bouma J. The role geostatistics in the design and analysis of field experiments with reference to the effect of soil properties on crop yield[C]//Soil Spatial Variability—Proceedings of a Workshop of the ISSS and the SSSA, 1985.
- 18 李哈滨,王政权. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报,1998,9(6): 651-657.  
Li Habin, Wang Zhengquan. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(6): 651-657. (in Chinese)
- 19 王卫华,王全九,武向博,等. 黑河中游绿洲麦田土壤水气热参数田间尺度空间分布特征[J]. 农业工程学报,2013,29(9): 94-102.  
Wang Weihua, Wang Quanjiu, Wu Xiangbo, et al. Characteristics of spatial distribution of soil water-air-heat parameters in typical oasis croplands at middle reaches of Heihe River[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(9): 94-102. (in Chinese)
- 20 Zu Y, Ma K, Zhang X. A fractal method for analyzing spatial heterogeneity of vegetation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(3): 333-337.
- 21 Szymanski D M, Hise R T. E-satisfaction: an initial examination[J]. Journal of Retailing, 2000, 76(3): 309-322.
- 22 Massey Jr F J. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit[J]. Journal of the American statistical Association, 1951, 46(253): 68-78.

## Application of Lattice Boltzmann Method to Overland Flow's Movement and Experimental Verification

Zhang Xiaona<sup>1</sup> Feng Jie<sup>2</sup> Zhang Donghui<sup>3</sup>

(1. College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2. Water Resources Research Institute, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China

3. School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** As the main reason for soil water erosion, the overland flow process should be simulated precisely to understand the mechanism of slop soil erosion process. Developed based on the kinetic theory, Lattice Boltzmann method has advantages of concise programming, parallel computing and complex geometric adaptability, etc. So its application in field of fluid motion becomes more and more extensively. The detailed steps about applying Lattice Boltzmann method to the movement of overland flow was given firstly, and then its validity was verified through artificial simulated rainfall experiment. The results indicate that if the time is processed by multi-scale approach and the space is not, the equilibrium distribution function is determined by the method of undetermined coefficients and multi-scale analysis, the distribution function about nodes of the upper boundary is replaced by the equilibrium distribution function through regarding the macroscopic upper boundary conditions as limiting conditions, and the distribution function about nodes of the lower boundary is set by extrapolation format of distribution function, Lattice Boltzmann method will successfully become a motion equation solver. The errors of runoff depth are within  $\pm 11\%$ .

**Key words:** Overland flow Lattice Boltzmann method Multi-scale processing Equilibrium distribution function Artificial simulated rainfall

(上接第 100 页)

## Sample Spacing of Spatial Variability of Soil Hydraulic Parameters in Basin Scale Based on GPS and Google Earth

Wang Weihua<sup>1</sup> Wang Quanjiu<sup>2,3</sup>

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

3. State Key Lab of Soil Erosion and Dryland Farm on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** There are some problems, such as how to use advanced methods, how to make less work, economical and reasonable experimental design and how to make representative sampling points during soil analysis. The above-mentioned problems are becoming research difficulties and hotspots in recent years. A research on spatial variability of soil hydraulic parameters basin scale in Jinghui Irrigation, Shaanxi Province was made based on GPS and Google Earth methods. The results showed that saturated soil moisture content and saturated hydraulic conductivity moderate variation in the regional scale show out moderate variability and strong spatial dependence. The best-fitting models for saturated soil moisture content and saturated hydraulic conductivity are spherical model and exponential model, respectively. As for the above two, the sample spacing of 2.38 km and 7.14 km are recommended.

**Key words:** Soil hydraulic parameters Spatial variability Sample spacing Basin scale GPS Google Earth