

大沽河流域土壤饱和导水率空间变异特征^①

廖凯华¹, 徐绍辉^{1*}, 程桂福²

(1 青岛大学环境科学系, 山东青岛 266071; 2 青岛市水利局, 山东青岛 266071)

Spatial Variation of Soil Saturated Hydraulic Conductivity in Dagu River Basin

LIAO Kai-hua¹, XU Shao-hui¹, CHENG Gui-fu²

(1 Department of Environmental Science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China;

2 Qingdao Water Conservancy Bureau, Qingdao, Shandong 266071, China)

摘 要: 借助经典统计学和地质统计学, 对大沽河流域农田土壤表层 (0~10 cm) 和下层 (40~50 cm) 饱和导水率 (K_s) 空间变化规律进行研究, 结果表明: ①经对数变换后土壤表层和下层 K_s 符合正态分布, 变异系数分别为 0.396 和 0.343, 均属于中等变异程度; ②土壤表层 K_s 空间相关性很弱, 下层 K_s 具有中等的空间相关性, 且具有各向异性特征; ③土壤表层和下层 K_s 的空间分布结构较相似, 均表现出东部和西南部最高, 西北部最低, 从西北角向东南方向逐渐增大的趋势。

关键词: 大沽河流域; 土壤; 饱和导水率; 空间变异

中图分类号: S152.72

土壤饱和导水率 (K_s) 指土壤所有的大小孔隙都充满水时, 单位水势梯度下, 单位时间内通过单位面积的水量, 对特定土壤 K_s 为一常数。 K_s 是土壤水分研究中的重要参数, 是衡量土壤饱和和渗透能力的重要指标^[1-3]。研究大沽河流域农田生态系统土壤 K_s 的空间变化特征, 有助于深入理解该地区降雨入渗、土壤水分运动规律, 对指导农田灌溉、提高水资源利用效率, 缓解青岛市水资源紧张状况有着非常积极意义。

本研究通过野外布点实测土壤表层和下层 K_s , 根据经典统计学和地质统计学原理进行 K_s 的空间变异结构分析, 利用 SPSS12.0 软件对数据进行正态分布检验以及统计特征值计算, 通过 ArcGIS9.2 地统计软件中的 Geostatistical Analyst 扩展模块分别建立了土壤表层和下层 K_s 的半方差函数模型, 再采用 Ordinary Kriging 插值方法分别绘制土壤表层和下层 K_s 的空间分布图, 为田间的精确灌溉及其他的农田精确管理提供科学依据。

1 研究区概况

大沽河是山东半岛最大的河流, 位于胶东半岛西

部, 流经青岛的莱西、平度、胶州和即墨 4 市, 约在东经 120°03'~120°25', 北纬 36°10'~37°12' 之间。流域总面积 4631.3 km², 土壤类型主要为棕壤、潮土和砂姜黑土。流域内属华北暖温带沿海湿润季风区, 温差不大, 全年无霜期约 200 天, 多年平均降雨量 707.4 mm, 径流量 22.51 亿 m³。

2 试验设计

野外试验时间是 2007 年 11 月 3 日至 13 日, 根据流域内的土壤质地及土地利用情况, 共设置了 97 个试验点 (图 1), 利用澳大利亚悉尼生产的圆盘渗透仪 (disc permeameter) 分别测定土壤表层 (0~10 cm) 和下层 (40~50 cm) 近于饱和的导水率。

3 基本理论与分析方法

3.1 基本理论

3.1.1 经典统计学原理 利用经典统计学原理进行空间变异分析时, 要求将采集的信息作为独立观测值——纯随机事件处理, 对变异特征的分析主要以变异系数 C_v 进行。

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40771095) 和青岛市水利科技项目 (2006-003) 资助。

* 通讯作者 (shhxu@qdu.edu.cn)

作者简介: 廖凯华 (1984—), 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 主要从事土壤水资源方面的学习和研究。E-mail: liaokaihua1984@163.com

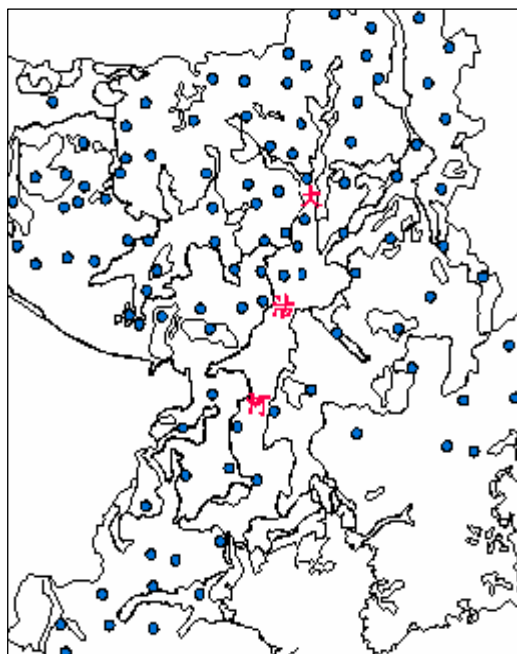


图 1 土壤试验点分布图

$$C_v = S / \bar{x} \quad (1)$$

式中: S 为标准差; $\bar{x}$ 为变量平均值。根据变异程度分级, $C_v \leq 0.1$ 属于弱变异性, $0.1 < C_v < 1$ 属于中等变异性, $C_v > 1$ 属于强变异性^[4]。

3.1.2 地统计学原理 地统计(Geostatistics)又称地质统计,是在法国著名统计学家 G. Matheron 大量理论研究的基础上逐渐形成的一门新的统计学分支。它是以区域化变量为基础,借助变异函数,研究既具有随机性又具有结构性,或空间相关性和依赖性的自然现象的一门学科。地统计学既考虑到样本值的大小,又重视样本空间位置及样本间的距离,弥补了经典统计学忽略空间方位的缺陷。地统计分析理论基础包括前提假设,区域化变量,变异分析和空间估值,具体内容见文献^[5]。

(1) 半方差计算与模型。地统计学根据半方差的变化规律进行空间变量变异特征分析。区域化变量 $Z(x)$ 在点 x 和 $x+h$ 处的值 $Z(x)$ 与 $Z(x+h)$ 差的方差的一半称为区域化变量 $Z(x)$ 的半变异函数,记为 $r(h)$,假设随机函数均值稳定,方差存在且有限,则该值仅和间距 h 有关。实验半方差计算公式如下:

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

式中: $r(h)$ 为半方差; $2N(h)$ 为相距 h 的数据点的对数。

半方差函数一般用半方差图来表示,它是半方差函数 $r(h)$ 值对距离 h 的函数图。在半方差图中有两个非常重要的点:间隔为 0 时的点和半方差函数趋近平稳时的拐点,由这两个点产生 4 个相应的参数:块金值 C_0 (nugget)、偏基台值 C (partial sill)、基台值 $C_0 + C$ (sill)、变程 a (range)。块金值 C_0 表示由实验误差或小于实验取样尺度引起的变异,较大的块金值说明了在较小尺度下存在着重要的生态过程;基台值 $C_0 + C$ 表示了空间变量间最大变异程度;变程 a 表示变量空间自相关性特征长度。

(2) 空间估值。点 Kriging 插值方法是地统计中最常用的插值法, Kriging 插值实质是一个实行局部估计的加权平均值:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3)$$

式中: $Z(x_0)$ 是在未经观测的点 x_0 上的内插估计值, $Z(x_i)$ 是在点 x_0 附近的若干观测点上获得的实测值, λ_i 是考虑了半方差图中表示空间的权重^[5]。

3.2 分析方法

数据处理利用 SPSS12.0 软件和 ArcGIS9.2 地统计软件中的 Geostatistical Analyst 扩展模块分析完成。

4 结果与讨论

4.1 数据分析

野外实测土壤表层 (0 ~ 10 cm) 和下层 (40 ~ 50 cm) K_s 值,利用 SPSS12.0 软件中柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验法 (K-S 检验) 分别进行正态分布检验,结果均不符合正态分布的假设。通过对表层和下层 K_s 进行对数变换之后再经 K-S 检验,结果见表 1,可以看出:①表层 K_s 值经对数变换后, K-S 检验得出的 $Z = 0.901$, 双侧 p 值为 $0.391 > 0.05$, 符合正态分布的假设;②下层 K_s 值经对数变换后, K-S 检验得出的 $Z = 0.462$, 双侧 p 值为 $0.983 > 0.05$, 也符合正态分布的假设。同时也可利用 Q-Q 图 (quantile quantile plot) 来判别样本数据是否近似于正态分布, Q-Q 图实质是以标准正态分布的分位数为纵坐标, 样本值为横坐标所作的散点图,从图 2 和图 3 中我们可以看到,图中各点已近似在一条直线上,表明经对数变换后表层和下层 K_s 已呈近似正态分布。

4.2 统计特征

按照经典统计方法,对数变换后土壤表层和下层 K_s 统计特征值见表 2。从表 2 可以看出,对数变换后

表层和下层 K_s 变异系数分别为 0.396 和 0.343, 按照变异系数的划分等级两者均属于中等变异性。

由于经典统计方法只在一定程度上反映样本全

体, 不能反映其局部的变化特征, 因此必须进一步采用地统计方法进行空间变异结构分析。

表 1 对数变换后表层和下层土壤 K_s 值K-S检验结果 (mm/h)

土层	样点数	正态分布参数		经验分布和理论分布差值			检验统计量 Z	双侧 p 值
		平均值	标准差	最大绝对值	正值	负值		
表层	97	0.98	0.40	0.091	0.091	-0.058	0.901	0.391
下层	97	1.20	0.41	0.047	0.047	-0.043	0.462	0.983

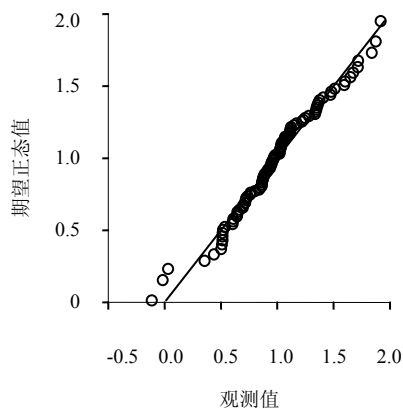


图 2 对数变换后表层 K_s 正态 Q-Q 图

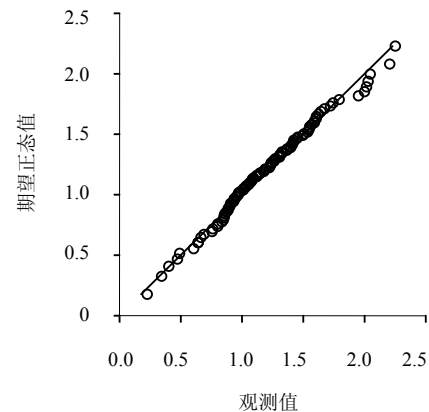


图 3 对数变换后下层 K_s 正态 Q-Q 图

表 2 对数变换后表层和下层土壤 K_s 统计特征值 (mm/h)

土层	样点数	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
表层	97	1.92	-0.11	0.98	0.39	0.396
下层	97	2.25	0.23	1.20	0.41	0.343

4.3 空间变异结构分析

描述变量空间变异特征的常用半方差模型主要有球形模型、高斯模型和指数模型等, 利用 ArcGIS9.2 地统计软件中的 Geostatistical Analyst 扩展模块, 分别考虑 3 种模型, 选择无趋势、一阶趋势 (区域化变量沿一定方向呈直线变化) 和二阶趋势 (区域化变量沿一定方向呈多项式变化) 效应参数, 考虑各向异性进行拟合, 对不同模型不同趋势阶数土壤表层和下层 K_s 的 Kriging 插值误差进行比较 (表 3)。判断半方差函数模型及其参数是否合适可按以下标准综合进行: 平均误差 (ME) 的绝对值最接近于 0; 标准化平均误差 (MSE) 最接近于 0; 均方根误差 (RMSE) 越小越好; 平均标准误差 (ASE) 与均方根误差 (RMSE) 最接近, 如果 $ASE > RMSE$ 则高估了预测值, 反之如果 $ASE < RMSE$ 则低估了预测值; 标准化均方根

误差 (RMSSE) 最接近于 1, 如果 $RMSSE < 1$, 则高估了预测值, 反之如果 $RMSSE > 1$, 则低估了预测值^[6]。

由表 3 可以看出, 在进行 Ordinary Kriging 插值时, 表层 K_s 与指数模型无阶趋势效应拟合最好; 下层 K_s 与指数模型一阶趋势效应拟合最好。选择最佳模型进行拟合从而得到相应的模型参数 (表 4)。

从结构性因素看, 空间相关性的强弱可由 $C/(C_0 + C)$ 值来反映, 该值越大, 空间相关性越强; 相应地, $C_0/(C_0 + C)$ 称为基底效应, 表示样本间的变异特征, 该值越大, 表示样本间的变异更多的是由随机因素引起的。 $C_0/(C_0 + C)$ 的比值 $< 25\%$, 说明变量具有强烈的空间相关性; 比值在 $25\% \sim 75\%$, 说明变量具有中等的空间相关性; 比值 $> 75\%$, 说明变量空间相关性很

弱^[7]。从表 4 可以看出,土壤表层 K_s 空间相关性很弱。说明影响土壤表层 K_s 空间分布的随机性因素很强,即受人为因素影响很大;下层 K_s 具有中等的空间相关性,说明土壤下层 K_s 空间分布是由结构性因素(如地形地貌、土壤母质、土壤类型等)和随机性因素共同作用的结果,空间变异具有各向异性特征,在各轴方向上表现出自相关距离分别为 119.313 km和 97.993 km空

间结构特征^[8]。

4.4 Kriging 空间插值分析

为准确直观地描述大沽河流域土壤 K_s 的空间结构分布特征,利用 ArcGIS9.2 地统计软件中的 Geostatistical Analyst 扩展模块,根据所得的半方差函数模型,采用 Ordinary Kriging 插值法分别绘制土壤表层和下层 K_s 的空间分布图(图 4 和图 5)。

表 3 表层和下层土壤 K_s 不同模型不同趋势阶数的 Kriging 插值误差比较

土层	趋势效应	模型	ME	RMSE	ASE	MSE	RMSSE
表层	无	球形	-0.050	15.62	17.92	-0.063	1.058
		高斯	-0.020	15.67	18.07	-0.061	1.050
		指数	0.002	15.34	17.89	-0.027	0.947
	一阶	球形	-0.318	15.75	16.59	-0.080	1.134
		高斯	-0.379	15.87	16.55	-0.095	1.183
		指数	-0.391	15.81	16.52	-0.091	1.149
	二阶	球形	-0.055	15.48	16.17	-0.075	1.301
		高斯	-0.055	15.48	16.17	-0.075	1.301
		指数	-0.055	15.48	16.17	-0.075	1.301
下层	无	球形	-1.137	30.91	40.20	-0.033	0.826
		高斯	-0.955	30.70	43.05	-0.023	0.762
		指数	-1.170	31.15	40.25	-0.042	0.851
	一阶	球形	-1.748	30.73	31.65	-0.083	1.162
		高斯	-1.845	30.75	32.02	-0.084	1.141
		指数	-1.504	30.84	32.06	-0.067	1.093
	二阶	球形	-1.023	31.24	31.01	-0.107	1.313
		高斯	-1.102	31.28	31.21	-0.111	1.302
		指数	-0.591	31.89	31.76	-0.122	1.362

表 4 表层和下层土壤 K_s 半方差函数模型参数

土层	模型	C_0	C	C_0+C	a (km)		$C_0/(C_0+C)$
					长轴	短轴	
表层	指数	0.686	0.146	0.832	119.154	40.170	82.45
下层	一阶指数	0.663	0.234	0.987	119.313	97.993	73.91

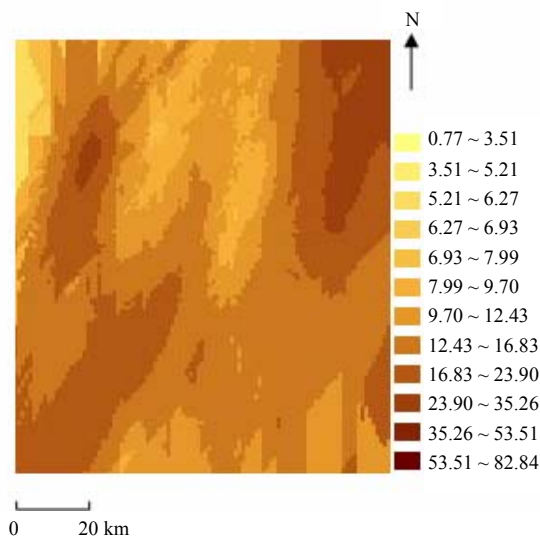


图 4 土壤表层 K_s (mm/h) 空间分布图

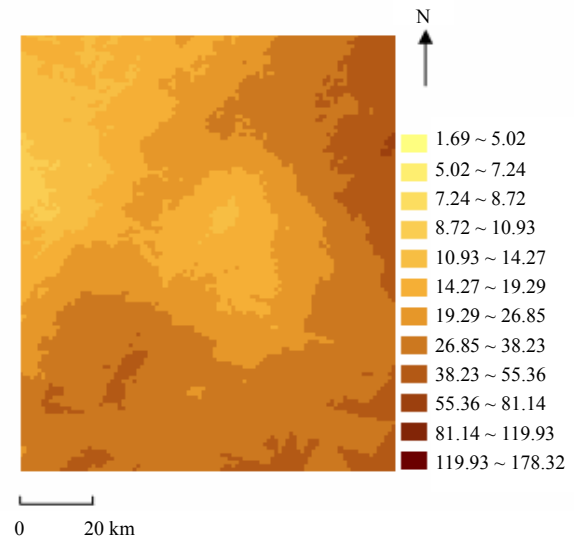


图 5 土壤下层 K_s (mm/h) 空间分布图

(1) 整体来看, 流域土壤表层和下层 K_s 的空间分布结构较相似, 表明同一土壤剖面表层和下层 K_s 之间具有一定的正相关性, 且均具有明显的方向性和连续性, 呈现出东部和西南部最高, 西北部最低, 从西北角向东南方向逐渐增大的趋势。

(2) 从局部看, 流域土壤表层和下层 K_s 较低值均位于西北部和中部分区域, 结合青岛市土壤图(图6)分析其原因, 该区域土壤类型主要为黑土裸露砂姜黑土和湿潮土, 黑土裸露砂姜黑土耕作层多为中壤土, 黑土层和砂姜层为中壤土或重壤土, 该土属质地黏重, 速效养分含量低, 农业生产性能较差; 湿潮土是在较长期积水或较高位潜水条件下形成的土壤, 该土属质地黏重, 含物理性黏粒 18.66%~60.26%, 潜育化明显, 因此该区域土壤饱和和导水率较低。而西南部和东部区域土壤类型主要是棕壤和砂质或壤质河潮土, 棕壤成土母质为酸性岩或基性岩坡、洪积物, 土质疏松, 质地多为砂壤土至轻壤土; 潮土发育于河相沉积物, 剖面沉积层理不明显, 通体为砂均质或砂壤均质, 所以这部分区域土壤 K_s 较高。还值得注意的是, 从图4和图5中可以看出, 东北部土壤 K_s 尤其偏高, 这是因为该区域位于大沽河上游, 土壤母质类型为河流冲积母质, 受河流冲积物粗细及人为利用方式等影响, 上游、近河床或急流处冲积物较粗, 多属砂土或砂质壤土, 于是 K_s 明显偏高。

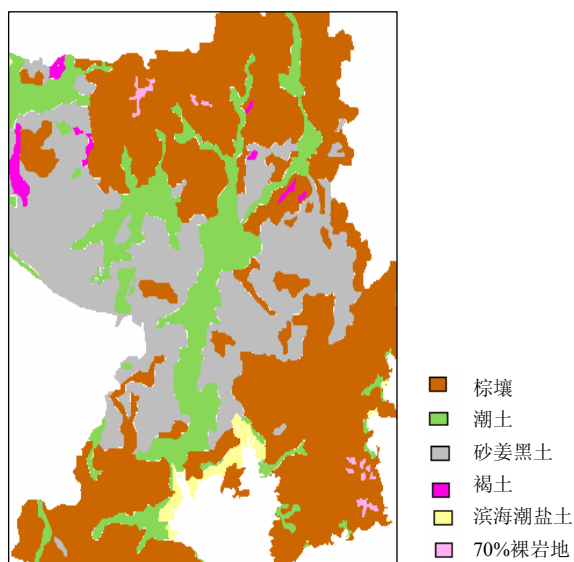


图6 青岛市土壤图

5 结论

(1) 正态分布检验和经典统计分析表明, 经对数变换后土壤表层(0~10 cm)和下层(40~50 cm) K_s 符合正态分布, 变异系数分别为 0.396 和 0.343, 均属于中等变异程度。

(2) 空间变异结构分析表明, 土壤表层 K_s 空间相关性很弱, 样本间的变异更多的是由随机因素引起的; 下层 K_s 具有中等的空间相关性, 即样本间的变异是由结构性因素和随机性因素共同作用的结果, 且空间变异具有各向异性特征。

(3) 从 Kriging 插值的结果可知, 土壤表层和下层 K_s 的空间分布结构较相似, 均表现出东部和西南部最高, 西北部最低, 从西北角向东南方向逐渐增大的趋势, 土壤类型和土壤质地是影响 K_s 大小的重要因素。

参考文献:

- [1] 陈效民, 潘根兴, 王德建, 李宝山. 太湖地区农田生态环境中土壤饱和和导水率研究. 水土保持通报, 2000, 20(5): 11-12
- [2] 华孟, 王坚. 土壤物理学. 北京: 北京农业大学出版社, 1993
- [3] 白冰, 陈效民, 秦淑平. 黄河三角洲滨海盐渍土饱和和导水率的研究. 土壤通报, 2005, 36(3): 321-323
- [4] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和和导水率空间变异特征. 水土保持学报, 2004, 18(3): 53-56
- [5] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程. 北京: 科学出版社, 2006
- [6] 张一扬, 周冀衡, 杨虹琦, 胡志明. 基于地统计与GIS技术的土壤有机质空间变异性研究——以湖南主产烟区为例. 中国烟草学会 2006 年学术年会论文集, 2007
- [7] Cambardella CA, Moorman T B, Novak JM. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1994, 58: 1501-1511
- [8] 蔺娟, 地里拜尔苏力坦, 艾尼瓦尔·买买提. 新疆盐渍化区土壤养分的空间结构和分布特征. 干旱区资源与环境, 2007, 21(11): 113-117