

黄河冲积平原表层土壤水力学参数的空间变异特征

刘莉莉¹, 王琳², 赵贵章¹, 潘登^{2*}, 湛江¹

(1. 华北水利水电大学, 河南郑州 450046; 2. 河南省地质环境监测院, 河南郑州 450006)

摘要 为了解黄河冲积平原表层土壤水力学参数的空间变异特征,以河南省兰考县为分析对象,采用地统计学和 GIS 相结合的方法,分析土壤表层水力学参数的空间变异。结果表明,土壤干容重和土壤含水率的变异系数分别为 7.8%、9.2%,呈现出弱变异;土壤渗透系数的变异系数为 173.2%,呈现出强变异。土壤水力学参数均具有二阶趋势效应。土壤干容重和土壤含水率的块基比分别为 0.458、0.500,具有中等空间自相关性;土壤渗透系数的块基比为 0.034,具有强空间自相关性。研究区土壤干容重和土壤含水率整体均表现为由西向东逐步增大;土壤渗透系数较大值主要集中在北部,较小值主要集中在中东部,整体表现为由中部向四周逐步增大。

关键词 黄河冲积平原;土壤水力学参数;地统计学;GIS;空间变异

中图分类号 S 152.7 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)06-0060-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.06.013



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Spatial Variation Characteristics of Surface Soil Hydraulics Parameters in the Yellow River Alluvial Plain

LIU Li-li¹, WANG Lin², ZHAO Gui-zhang¹ et al (1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046; 2. Geological Environmental Monitoring Institute of Henan Province, Zhengzhou, Henan 450006)

Abstract In order to understand the spatial variability characteristics of surface soil hydraulic parameters in the Yellow River alluvial plain, taking Lankao County in Henan Province as the object of analysis, the method of combining geostatistics and GIS was used to analyze the spatial variability of soil surface hydraulic parameters. The results showed that the coefficient of variation of soil dry bulk density and soil water content were 7.8% and 9.2%, respectively, showing a weak variability. The coefficient of variation of soil permeability coefficient was 173.2%, showing strong variability. The soil hydraulic parameters all had a second-order trend effect. The block-to-basis ratio of soil dry bulk density and soil moisture content were 0.458 and 0.500, respectively, which had medium spatial autocorrelation; the block-to-basis ratio of soil permeability coefficient was 0.034, which had strong spatial autocorrelation. The soil dry bulk density and soil moisture content in the study area showed a gradual increase from west to east as a whole. The larger value of soil permeability coefficient was mainly concentrated in the north, and the smaller value was mainly concentrated in the middle and east, the overall performance was gradually increasing from the middle to the surroundings.

Key words Yellow River alluvial plain; Soil hydraulics parameters; Geostatistics; GIS; Spatial variation

作为水资源的重要组成部分,土壤水分对于研究地表径流、水分转化、土壤侵蚀、溶质运移等过程起非常重要的作用,也是流域水文过程研究的重要内容之一^[1]。受土壤本身、地形、土地利用类型、植被以及气候条件等因素随机性、非线性时空分布的影响^[2],土壤水力学参数在不同取样尺度上均存在空间异质性^[3]。其中大尺度主要受控于降雨和蒸发格局等;而小尺度则决定于地形、根系、土壤和光等^[4-6]。土壤水力学参数是生态学、土壤学和水文学等的研究热点,其研究主要集中在空间变异性、不同时间序列土壤水分布的影响因素及利用分布式水文模型定量研究土壤水分的时空分布 3 方面^[7],研究尺度主要为田间、坡面、洼地、流域或区域等^[8-11]。国内外已对土壤水力学参数的空间变异及其影响因素开展了大量研究,研究尺度主要为林分、坡面、小流域、流域或区域等^[3,12-13],主要集中在黄土高原、高寒草甸、喀斯特地区等干旱或半干旱地区^[8,14]。而针对黄河冲积平原的土壤水力学参数的空间变异性研究至今鲜见报道。

黄河冲积平原(河南段)位于黄河下游、河南省东北部。该地区以引黄灌溉和开采浅层地下水井灌为主,辽阔平坦,但微地貌差异明显,其流域水文过程对反映黄河冲积平原的包气带空间结构以及生态需水安全等具有重要意义。为此,

笔者采用地统计与 GIS 相结合的方法,分析黄河冲积平原土壤水力学参数的空间变异。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 研究区位于河南省开封市兰考县(图 1),处于河南省中部偏东,是黄河冲积扇平原的尖端,地理位置 114°58'41"~114°59'41"E, 34°52'14"~34°54'45"N,面积约 15.75 km²。研究区地势平坦,平均海拔约 50 m。该区多年平均气温 14.52℃,属暖温带大陆性季风气候,春季干旱多风,夏季高温多雨,秋季天高气爽,冬季寒冷干燥,四季分明^[15]。土地利用方式为农田,以小麦、玉米轮作耕种为主,一年两熟。

1.2 样品采集与测定 该研究于 2019 年 7 月进行土壤样品的采集,采用网格法对样点进行初步布设,网格大小为 500 m×500 m,10 行 8 列,共计 80 个点,该研究采用其中 60 个点作为研究对象,具体分布如图 1 所示。采样深度为 0~0.3 m,采样时进行载波相位差分技术(RTK)定位,采集环刀样。采用变水头法测定饱和渗透系数,环刀法测定其干容重,烘干法测定其土壤含水率。

1.3 数据处理与统计学分析

1.3.1 经典统计研究。采用 SPSS 24.0 软件,分析前采用 3 倍标准差检验法对离群值进行识别,对离群值分别用正常的最大值和最小值代替。检验样点数据是否符合地统计学插值条件,采用 Kolmogorov-Smirnov(简称 K-S)检验法^[16-18]分

作者简介 刘莉莉(1993—),女,河南周口人,硕士研究生,研究方向:包气带土壤水运动。*通信作者,高级工程师,硕士,从事水文地质工程地质研究。

收稿日期 2021-07-19

析样点原始数据是否符合正态分布。其中,变异系数(coefficient of variation, CV)指标准差与平均值之比,是经典统计学用于确定变异程度的重要指标,若 $CV < 10\%$, 表明数据呈弱变异, $10\% \leq CV < 100\%$ 呈中等变异, $CV \geq 100\%$ 呈强变异^[19]。

1.3.2 地统计学分析。采用 ArcGIS 10.4 地统计软件对变量进行趋势效应、误差检验分析以及克里格插值绘制预测图,

采用 GS+9.0 软件进行半方差函数分析。依据空间变异分析原理,用块金效应表示空间相关性强弱。块金效应为块金值与基台值的比值,一般认为,小于 0.25 变量具有强空间自相关性,0.25~0.75 变量具有中等空间自相关性,大于 0.75 变量具有弱空间自相关性^[20]。

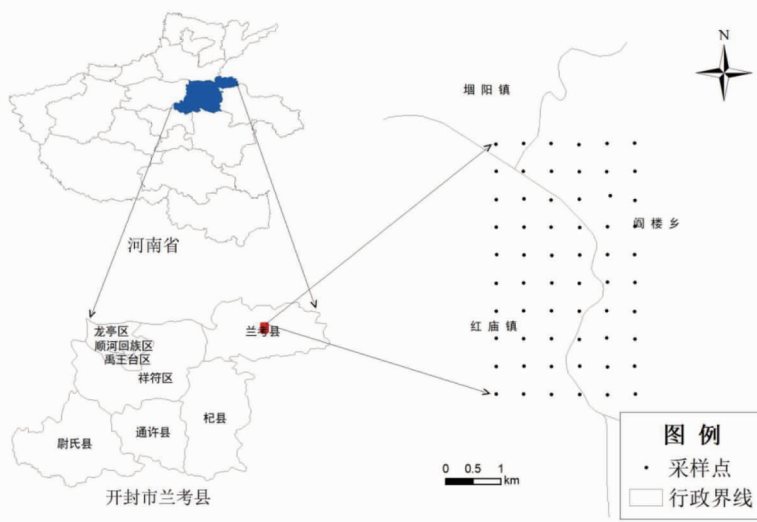


图 1 研究区位置及采样点分布

Fig.1 Location and sampling point distribution in the study area

2 结果与分析

2.1 土壤水力学参数的描述性统计 通过对研究区表层干容重、土壤含水率及渗透系数的数据进行描述性统计分析(表 1),可以依据土壤各参数信息粗略估计研究区域相应性状的变异程度。从变异系数看,土壤干容重和土壤含水率的变异系数分别为 7.8%、9.2%,呈现出弱变异;土壤渗透系数的变异系数为 173.2%,呈现出强变异。半方差函数的计算一般要求数据符合正态分布的规律,否则可能存在比例效应^[21]。在显著性水平 0.05 的单样本 K-S 检验下,土壤渗透系数经对数转换后服从正态分布,土壤干容重和土壤含水率符合正态分布。

表 1 表层土壤水力学参数的分布特征

Table 1 Distribution characteristics of hydraulic parameters of surface soil

项目 Item	土壤干容重 Dry bulk density kN/m ³	土壤含水率 Soil moisture content//%	土壤渗透系数 Soil permeability coefficient cm/s
最小值 Min	12.055	34.470	1.718×10^{-6}
平均值 Mean	12.224	42.175	5.445×10^{-4}
最大值 Max	12.055	53.240	5.296×10^{-3}
标准差 SD	0.956	3.918	9.434×10^{-4}
变异系数 CV//%	7.8	9.2	173.2
分布类型 Distribution type	正态	正态	对数正态

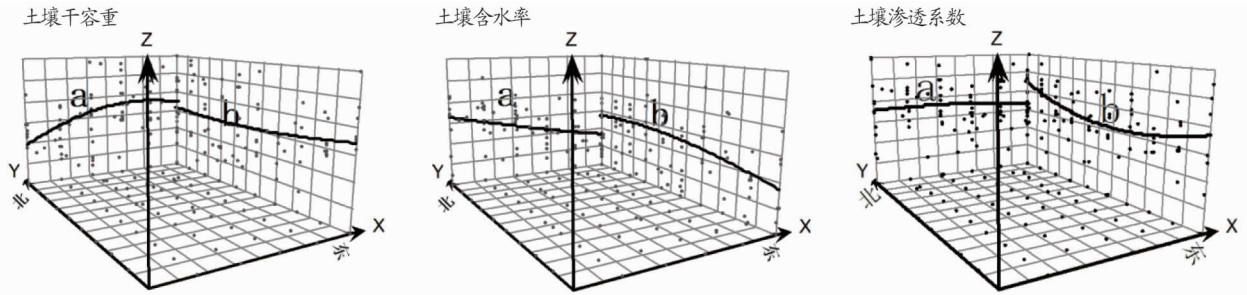
2.2 趋势效应和插值模型选择 空间趋势效应反映空间变量全局变化趋势,一般用 0~2 阶多项式来描述空间趋势效

应。受成土因素、自然地理条件及人类活动的影响,区域土壤水力学参数的空间分布常呈明显的趋势特征,在空间插值分析中不容忽视。运用 ArcGIS 10.4 的地统计分析模块获得土壤水力学参数的趋势效应^[22-23],从图 2 可以看出,土壤干容重在南—北方向呈“U”字型,在东—西方向呈倒“U”字型;土壤含水率在南—北方向呈倒“U”字型,在东—西方向呈“U”字型,但其变化弧度不大;土壤渗透系数在东—西方向呈倒“U”字型,在南—北方向呈“U”字型,但东—西方向弧度变化不大。

在考虑各向异性的情况下,分别选择 0 阶趋势、一阶趋势、二阶趋势效应参数结合普通克里格插值方法造成的插值误差进行了比较(表 2)。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:平均误差的绝对值最接近于 0;标准化平均误差最接近于 0;均方根误差越小越好;如果标准化均方根误差 < 1,则高估了预测值,反之则低估了预测值^[24]。由表 2 可知,在进行普通克里格插值时,土壤干容重球状模型一阶趋势效应拟合效果最佳;土壤含水率高斯模型二阶趋势效应拟合效果最佳;土壤渗透系数指数模型二阶趋势效应拟合效果最佳。

2.3 土壤水力学参数的结构分析 土壤水力学参数的空间变异是由结构性因素和随机性因素共同作用的结果。用 GS+9.0 软件计算半方差函数,由表 3 可知,土壤干容重和土壤含水率的块基比分别为 0.458、0.500,具有中等空间自相关性,主要影响因素既有结构性因素(如土壤母质、地形等),也有随机因素(如灌溉、施肥、耕作措施等人类活动)。土壤渗透系数的块基比为 0.034,具有强空间自相关性,主要影响因

素在于结构性因素。在变程中,土壤渗透系数的变程最小,且远大于取样间隔,说明其空间连续性的尺度范围最大。说明其空间连续性的尺度范围较小;土壤含水率的变程最大



注:曲线 a 表示东—西向的趋势效应变化;曲线 b 表示南—北向的趋势效应变化

Note: Curve a represents the east-west trend effect change; curve b represents the south-north trend effect change

图 2 土壤水力学参数的趋势效应

Fig.2 Trend effect of soil hydraulics parameters

表 2 表层土壤水力学参数不同趋势插值模型误差的比较

Table 2 Comparison of interpolation model errors of surface soil hydraulics parameters with different trends

参数 Parameter	趋势效应 Trend effect	模型 Model	预测误差 Prediction error				
			平均误差 Mean error	均方根误差 Root mean square error	平均标准误差 Mean standard error	标准化平均误差 Standardized mean error	标准化均方根误差 Standardized root mean square error
土壤干容重 Soil dry bulk density	0 阶	球状	-0.012	0.722	0.741	-0.013 8	0.976 6
		指数	-0.013	0.740	0.749	-0.014 2	0.992 9
		高斯	-0.012	0.731	0.742	-0.013 5	0.989 9
	一阶	球状	-0.011	0.740	0.747	-0.012 4	0.994 8
		指数	-0.020	0.741	0.739	-0.023 8	1.007 0
		高斯	-0.014	0.732	0.740	-0.015 4	0.993 4
	二阶	球状	-0.013	0.724	0.739	-0.014 0	0.982 4
		指数	-0.021	0.756	0.752	-0.024 1	1.010 0
		高斯	-0.019	0.747	0.744	-0.022 9	1.008 2
土壤含水率 Soil moisture content	0 阶	球状	0.087	4.895	5.082	0.015 5	0.968 5
		指数	0.106	4.928	5.171	0.018 4	0.960 2
		高斯	0.077	4.905	5.102	0.013 4	0.967 1
	一阶	球状	0.093	4.882	5.060	0.016 6	0.970 2
		指数	0.114	4.912	5.148	0.020 0	0.961 5
		高斯	0.111	4.899	5.078	0.020 2	0.970 5
	二阶	球状	0.001	4.959	5.050	0.000 2	0.984 8
		指数	0.045	4.960	5.135	0.008 3	0.971 6
		高斯	-0.001	4.969	5.038	-0.000 3	0.990 2
土壤渗透系数 Soil permeability coefficient	0 阶	球状	-0.009	0.698	0.719	-0.012 6	0.974 5
		指数	-0.010	0.694	0.718	-0.013 3	0.970 5
		高斯	-0.009	0.699	0.719	-0.012 0	0.976 9
	一阶	球状	-0.011	0.703	0.720	-0.014 0	0.980 0
		指数	-0.011	0.699	0.719	-0.014 9	0.976 0
		高斯	-0.010	0.705	0.720	-0.013 9	0.982 6
	二阶	球状	0.001	0.704	0.714	0.001 2	0.991 3
		指数	0.001	0.708	0.717	0.001 5	0.993 2
		高斯	0.001	0.706	0.715	0.001 7	0.992 6

2.4 土壤水力学参数的空间分布特征 为了更加直观地反映黄河冲积平原土壤水力学参数的空间分布格局,在半方差结构模型的基础上,结合普通克里格插值方法,并考虑各向异性和趋势参数,获得了土壤水力学参数的空间分布格局图,各插值结果见图 3。从图 3 可以看出,土壤干容重较大值集中在西部,较小值主要分布在东南角及中北部,整体表现为由西向东逐步增大;土壤含水率较大值均集中在东南角,

较小值集中在西部,整体表现为由西向东逐步增大;土壤渗透系数较大值主要集中在北部,较小值主要集中在中东部,整体表现为由中部向四周逐步增大。

3 结论

该研究基于地统计学方法,且考虑趋势效应,采用 ArcGIS 对黄河冲积平原表层土壤水力学参数的空间变异进行研究,得出以下结论:

表 3 表层土壤水力学参数半方差函数分析

Table 3 Semi-variance function analysis of surface soil hydraulic parameters

参数 Parameter	模型 Model	块金值(C_0)	基台值 (C_0+C)	块基比 $C_0/(C_0+C)$	变量 Variable range//m	残差 Residual	决定系数 Determination coefficient
土壤干容重 Soil dry bulk density	球状	0.465	1.016	0.458	2 301.00	0.029	0.834
土壤含水率 Soil moisture content	高斯	10.780	21.570	0.500	4 271.23	12.600	0.740
土壤渗透系数 Soil permeability coefficient	指数	0.015	0.437	0.034	849.00	1.091×10^{-3}	0.794

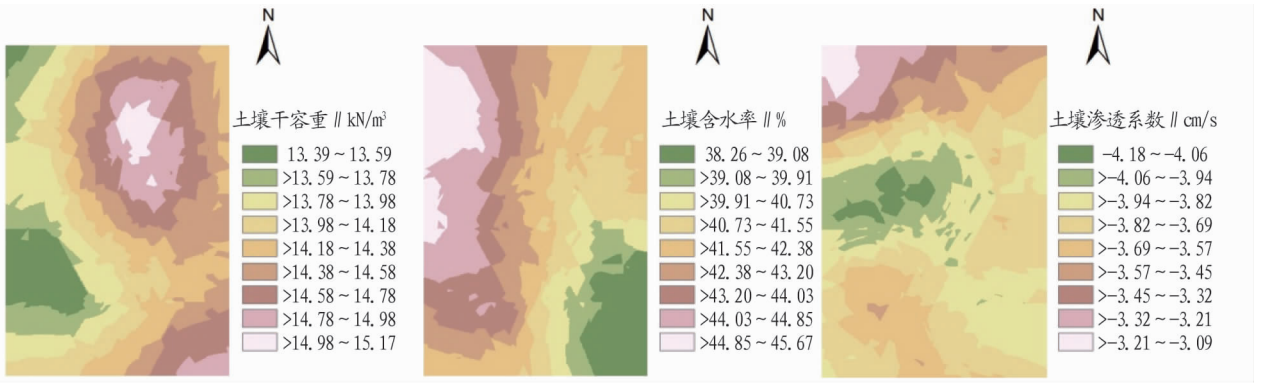


图 3 黄河冲积平原表层土壤水力学参数的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of surface soil hydraulics parameters in the Yellow River alluvial plain

(1) 从变异系数看,土壤干容重和土壤含水率的变异系数分别为 7.8%、9.2%,呈现出弱变异;土壤渗透系数的变异系数为 173.2%,呈现出强变异。

(2) 对土壤水力学参数普通克里格插值误差的综合比较表明,土壤干容重球状模型一阶趋势效应拟合效果最佳;土壤含水率高斯模型二阶趋势效应拟合效果最佳;土壤渗透系数指数模型二阶趋势效应拟合效果最佳。

(3) 土壤干容重和土壤含水率的块基比分别为 0.458、0.500,具有中等空间自相关性,主要因素在于结构性因素和随机性因素。土壤渗透系数的块基比为 0.034,具有强空间自相关性,主要影响因素在于结构性因素。

(4) 普通克里格插值图直观地反映了土壤水力学参数的分布特征。研究区土壤干容重较大值集中在西部,较小值主要分布在东南角及中北部,整体表现为由西向东逐步增大;土壤含水率较大值均集中在东南角,较小值集中在西部,整体表现为由西向东逐步增大;土壤渗透系数较大值主要集中在北部,较小值主要集中在中东部,整体表现为由中部向四周逐步增大。

参考文献

[1] 董起广,张扬,陈田庆,等.黄土高原丘陵沟壑区小流域坡面土壤水分分布特征[J].中国农村水利水电,2018(7):65-68,73.
 [2] 李小雁.干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制[J].中国科学:地球科学,2011,41(12):1721-1730.
 [3] 王存国,韩士杰,张军辉,等.长白山阔叶红松林表层土壤水分空间异质性的地统计学分析[J].应用生态学报,2010,21(4):849-855.
 [4] ENTIN J K, ROBOCK A, VINNIKOV K Y, et al. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics[J]. J Geophys Res, 2000, 105(D9):11865-11877.
 [5] 王世杰,李阳兵.喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势[J].地球科学进展,2007,22(6):573-582.
 [6] YAO X L, FU B J, LÜ Y H, et al. Comparison of four spatial interpolation methods for estimating soil moisture in a complex terrain catchment[J].

PLoS One, 2013, 8(1):1-13.
 [7] 蔡庆空,蒋金豹,崔希民,等.环境因子对土壤水分空间异质性的影响:以北京市怀柔区为例[J].山地学报,2013,31(3):294-299.
 [8] 李元寿,王根绪,丁永建,等.青藏高原高寒草甸区土壤水分的空间异质性[J].水科学进展,2008,19(1):61-67.
 [9] GAO X D, WU P T, ZHAO X N, et al. Estimation of spatial soil moisture averages in along gully of the Loess Plateau of China through statistical and modeling solutions[J]. J Hydrol, 2013, 486:466-478.
 [10] 杨兆平,欧阳华,徐兴良,等.五道梁高寒草原土壤水分和植被盖度空间异质性的地统计分析[J].自然资源学报,2010,25(3):426-434.
 [11] 彭晚霞,宋同清,曾毓平,等.喀斯特峰丛洼地旱季土壤水分的空间变化及主要影响因素[J].生态学报,2010,30(24):6787-6797.
 [12] 张川,陈洪松,张伟,等.喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征[J].应用生态学报,2014,25(6):1585-1591.
 [13] KORRES W, REICHENAU T G, FIENER P, et al. Spatio-temporal soil moisture patterns-A meta-analysis using plot to catchment scale data[J]. J Hydrol, 2015, 520:326-341.
 [14] 段良霞,黄明斌,张洛丹,等.黄土高原沟壑区坡地土壤水分状态空间模拟[J].水科学进展,2015,26(5):649-659.
 [15] 赵雯雯.开封市城市土壤重金属与多环芳烃污染及风险分析[D].开封:河南大学,2017.
 [16] 王超,王建宇,王菲,等.中卫市压砂地土壤有机质空间变异特点研究[J].土壤通报,2016,47(2):287-293.
 [17] 吕真真,刘广明,杨劲松,等.环渤海沿海区域土壤养分空间变异及分布格局[J].土壤学报,2014,51(5):944-952.
 [18] 赵明松,张甘霖,王德彩,等.徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析[J].土壤学报,2013,50(1):1-11.
 [19] 王军,傅伯杰,邱扬,等.用空间内插法研究黄土丘陵小流域土壤水分时空分布特征[J].自然科学进展,2002,21(4):430-433.
 [20] 宁娟,丁建丽,杨爱霞,等.基于可见光/近红外技术的干旱区绿洲土壤盐分空间分布识别[J].中国农村水利水电,2017(1):43-48.
 [21] 赵鑫,王存国,魏永霞.耕地主要土壤参数的空间变异特征[J].中国农村水利水电,2014(1):11-14,19.
 [22] 赵义博,雷少刚,刘英胜利.矿区土壤养分空间变异特征与影响因素[J].土壤,2020,52(2):356-364.
 [23] 张一扬,周冀衡,杨虹琦,等.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[C]//中国烟草学会.中国烟草学会2006年学术年会论文集.北京:中国烟草学会,2007:120-128.
 [24] 张娜,张栋梁,屈忠义,等.不同土层土壤粒径及有机质含量空间变异的相关性研究[J].节水灌溉,2016(12):1-7,14.