

文章编号:1673-9469(2024)04-0090-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.04.012

黄河下游冲积平原土壤水带土体质地空间变异特征研究

王琳^{1,2}, 潘登^{1,2*}, 关健^{1,2}, 刘丽丽³

(1. 河南省自然资源监测和国土整治院, 河南 郑州 450046; 2. 河南省自然资源科技创新中心(地下水资源调查监测研究), 河南 郑州 450046; 3. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046)

摘要: 选择河南省开封市兰考县中部闫楼乡作为研究区, 运用经典统计学、地统计学与Voxler相结合的方法, 研究土壤水带土体质地的空间变异性和分布规律。结果表明: 研究区土壤水带不同土体颗粒的空间变异性具有显著差异, 变异性强度为砂粒>黏粒>粉粒, 且土体质地的空间变异性强度随土壤水带深度增加而增大。土壤水带砂、粉、黏粒的空间相关程度不同, 空间相关性强度黏粒>砂粒>粉粒。土壤水带中, 砂粒在浅层的空间分布最优模型为高斯模型, 在中层和深层为球状模型; 粉粒在浅层和中层的空间分布最优模型均为高斯模型; 黏粒的空间分布最优模型在浅层和深层的为球状模型, 中层为高斯模型。

关键词: 黄河冲积平原; 土壤水带; 地统计学; 空间变异

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

Spatial Variability of Soil Water Zone Texture in the Alluvial Plain of the Lower Reaches of the Yellow River

WANG Lin^{1,2}, PAN Deng^{1,2*}, GUAN Jian^{1,2}, LIU Lili³

(1. Henan Provincial Institute of Natural Resources Monitoring and Land Consolidation with Rehabilitation, Zhengzhou, Henan 450046, China; 2. Henan Science and Technology Innovation Center of Natural Resources (Groundwater Resource Investigation and Monitoring), Zhengzhou, Henan 450046, China; 3. North China University of Water Resource and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China)

Abstract: This study elucidated the spatial variability of heterogeneous soil texture in the soil water zone combining the classical statistics, geostatistics and Voxler method for a real-world field in the Yanlou Township of the middle of Lankao County, Kaifeng City, Henan Province. The results showed that the spatial variability of different soil particles in the soil water zone in the study area was significantly different, and the variability intensity was sand>clay>silt, and the spatial variability intensity of soil texture increased with depth of soil water zone increasing. The spatial correlation degree of sand, silt and clay in soil water zone was different, and the spatial correlation strength was clay>sand>silt. In the soil water zone, the optimal distribution model of sand in the shallow layer is Gaussian model, and the optimal distribution model in the middle and deep layer is spherical model. The optimal models of particle spatial distribution in shallow and middle layers are Gaussian models. The optimal distribution model of clay particles is the spherical model in the shallow layer and deep layer, Gaussian model in the middle layer.

Key words: alluvial plain of Yellow River; soil water zone; geostatistics; spatial variation

土壤水带作为农作物赖以生存的物质基础, 也是水分循环的关键地带。认识土壤水带土体性质的空间变异性对于农业生产和用水匹配的精准

化、智慧化管理的实现都有着十分重要的指导意义^[1-2]。土壤颗粒是组成土壤水带结构体的基本单元, 其形态和数量的差异影响着土壤水带的养

收稿日期: 2023-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42202266); 河南省自然资源厅2019年度省自然资源科研项目(201937913)

作者简介: 王琳(1990-), 女, 河南南阳人, 硕士, 工程师, 从事水资源调查监测、地下水数值模拟方面的研究。

* 通信作者: 潘登(1985-), 男, 河南汝州人, 硕士, 高级工程师, 从事水文地质、工程地质和环境地质方面的研究。

分特征、物理性质和生态学功能^[3-4]。同时土壤颗粒组成被认为是土壤水带重要的特性参数,影响着土壤的保水性^[5]、保肥性^[6]和抗侵蚀能力^[7],极大程度作用于土壤水带饱和和非饱和水力参数、肥力状况、孔隙分布状况、淋溶、固碳和抗侵蚀能力等关键要素。土壤特性的空间变异性是指一个质地视为均一的区域内,在同一时间段,不同点的土体特性存在着的明显差异性^[8],研究各径级土壤颗粒分布特征是探明土壤性质变异规律的关键基础,已成为土壤科学领域的热点问题之一^[9-11]。Campbell 在土壤性质空间变异性研究中最先引入地统计学,分析了区域土壤颗粒组成和 pH 值空间变化,确定流域因子的空间变异性^[12];Ceri 利用传统统计学和地统计学方法研究分析了亚马逊盆地一个农场土壤特性的空间变异性,结果发现指数模型可以很好地拟合砂粒含量和黏粒含量的半方差函数^[13];Pan 等的研究表明利用土壤含水量能够较好预测土壤颗粒组成空间变异程度^[14]。在我国,早期对土壤质地的空间变异性研究中,雷志栋等^[15]应用半方差图和自相关图对田间土壤的颗粒组成进行了分析,结果表明土壤特性参数的空间变异性是显著的。随着地理信息技术的不断发展,越来越多的国内外学者开始运用各种各样的方法研究不同土层土壤特性的空间变异特征。刘小燕等用协克立格法对研究区非饱和带平均粒径进行了大尺度估值,并对其变异性进行了分析评价,结果表明协克里格法适用于土体粒径的空间分布的空间估值,地统计学能够反映平均粒径作为区域化变量的空间变异性^[16]。郭凌俐等分别应用经典统计学和地统计学方法对黄土区露天煤矿和内蒙古河套灌区的土壤粒径空间变异性进行了研究,研究结果均表明土壤颗粒具有中度空间变异^[17-18]。王东东等对红壤丘陵坡地土壤颗粒组成的空间分布特征进行研究,结果表明无论在水平方向还是垂直方向上,粉粒含量均无明显变化规律,而砂粒含量随土壤深度的变化程度大于粉粒和黏粒,植被类型及相应的耕作制度影响土壤颗粒的空间分布^[19]。

以上研究多出于在田间尺度上对土体理化性质的空间变异规律进行分析,缺乏从区域尺度上和垂向上对土体质地的变异性特征开展研究。本研究选取黄河冲积平原典型地段为研究区,应用经典统计学、地统计学与 Voxler 相结合的方法对 0~0.9 m 深度内不同土体质地开展空间变异性分

析,分析土壤水带土体质地的空间变异性规律,并优选出最适用于研究区土体质地的空间分布模型,从而为该地区农业生产的精细化管理、土壤水分运移规律研究提供理论依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

河南省兰考县位于河南省中东部,属于黄河下游冲积平原,北部距黄河仅 21 km。该区域所属的黄河下游灌区是我国粮食主产区之一,在保障我国粮食安全中发挥着重要作用。兰考县地形地貌受黄河影响较大,随着黄河的频繁决口改道,经洪水不断冲刷区内地表泥沙快速沉积,土壤水带土体不断更新,其土层沉积具有一定代表性,较好反映出黄河下游冲积平原泥沙的沉积过程^[20]。

本文选取位于兰考县中部的闫楼乡(114°57'23" E—115°00'02"E,34°54'27"N—34°52'31"N)作为研究区,南北长 4.5 km,东西长 2.5 km,面积为 11.25 km²。该区域自古以来集黄泛区、盐渍区和农业区于一体,且经过长期土地改良和固沙治沙等举措,极大程度地改善了区内的农业种植条件,并能够反映人类活动对土体质地分布的影响。研究区内属暖温带大陆性季风气候,四季分明,多年均气温为 14.3℃,海拔 46.5~54.0 m,土地利用类型以农耕地为主,以玉米、大豆、小麦为主要种植作物。

1.2 采样点分布与采样方法

本研究选用规则栅格布点法进行样点布设,网格间距为 500 m×500 m。样点布设为 10 行,6 列,共计布设采样点 60 个,使用 RTK 技术测定采样点坐标,具体样点分布见图 1。在 2019 年 7 月开展研究区土样采集,利用人工掘进法钻进后对每一样点钻孔进行分层取样。分别采集土壤水带 0~0.3 m,0.3~0.6 m 及 0.6~0.9 m 深度内样本,共计采集土样 180 个,以研究土壤水带不同土质土壤粒径(砂粒、粉粒、黏粒)的空间分布特点。

采用 QT-2012 型激光粒度仪测定土体颗粒组成和其百分含量,按照美国农业部土壤分类美国制分级标准,将土体颗粒划分为砂粒(粒径 2~0.05 mm),粉粒(粒径 0.05~0.002 mm)和黏粒(粒径<0.002 mm)。

1.3 数据处理

利用 SPSS24.0 对土壤水带的土体颗粒构成进

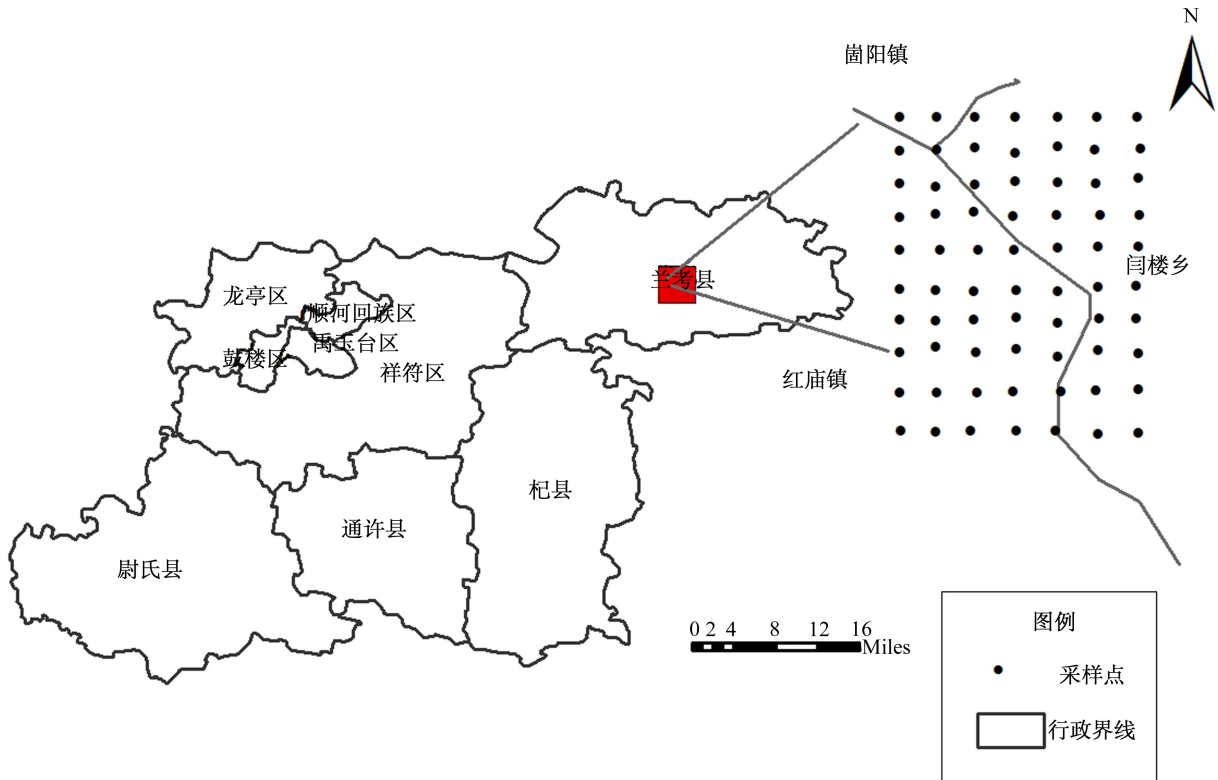


图1 采样区位置及样点分布图

Fig. 1 Location of sampling area and distribution of sample points

行描述性统计特征分析,并采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S)检验法进行正态检验。地统计学是进行区域化变量空间变异性分析的有力工具,本研究选用 GS+9.0 地质统计软件计算土壤水带颗粒的半变异函数,通过参数拟合确定土壤水带土体质地的空间分布最优模型。以土体颗粒空间变异性 and 相关性分析结果为基础,选用 Voxler 进行普通克里金插值反映研究区土壤水带土体质地的空间构成。研究方法及原理^[21-22]简介如下。

1.3.1 经典统计学空间变异分析理论

经典(传统)统计学要求空间变量在区域内符合随机分布特征,对空间变异性的衡量主要通过计算空间变量变异函数(C_v)进行。变异函数可定义为

$$C_v = S/\bar{X} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_v 为变异系数; S 为标准方差; \bar{X} 为变量均值。

变异程度分级: $C_v \leq 10\%$ 为弱变异性, $10\% < C_v < 100\%$ 为中等变异性, $C_v \geq 100\%$ 为强变异性^[23]。

1.3.2 地统计学空间变异分析理论

地统计学可以通过半方差函数计算和模型拟

合反映参数的随机特性和结构特性,从而有效反映出空间现象的所有变量。半方差函数的计算公式如下:

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

式中, $\gamma(h)$ 代表半方差函数值; $N(h)$ 代表相距为向量 h 的点对数; $Z(x_i)$ 为区域化变量 Z 在 x_i 处的实测值; $Z(x_i + h)$ 为与 x_i 距离为向量 h 处样点的值。以滞后距 h 为横轴,半方差函数值为纵轴可以绘制半方差图。判断模型拟合的优劣可通过决定系数 (R^2) 进行验证。根据半方差图可以明确块金值 C_0 , 基台值 $C_0 + C$, 变程 A 三个重要的特征值。 C_0 表示随机部分引起的空间变异性, $C_0 + C$ 表示变量的最大变异程度, A 表示变程即变量自相关范围。通过公式 $C_0/(C_0 + C)$ 计算可以得到反映空间异质性程度的块基比(空间异质比),其值大小表示由随机部分所引起的空间异质性程度。以区域变量的空间相关性分级标准进行界定时,块基比的值小于 25% 时,表示变量所具有的空间自相关性强烈;其值介于 25% 至 75% 之间,说明该变量的空间自相关性为中等;当计算值大于 75% 时,反映出变量的空间自相关性较弱;当该值接近 100% 时,则说明

该变量在整个尺度上具有恒定的变异性^[24]。

1.3.3 Voxler 软件建模方法

Voxler 软件是美国 Golden software 公司推出的三维可视化地质图像建模软件,较广泛地应用于地球物理数据的三维可视化表达^[25]。本次应用 Voxler 4 软件中 Computational(计算模块)下的 Gridder(网格化模型)处理数据。选用普通克里格插值法在 Voxler 软件中建立研究区的三维立体空间分布透视图,通过 Graphics Output(图形输出模块)制作土壤水带颗粒分布的三维切片,以直观清晰地反映研究区土体颗粒的空间分布状况。

2 结果与分析

2.1 描述性统计分析

经对研究区 60 个样点数据统计分析,结果如表 1 所示。研究区土壤水带砂粒平均含量在 10.14%~10.3%,粉粒平均含量在 77.54%~78.9%,黏粒平均含量在 10.88%~13.32%,各粒度含量的空间变异系数介于 16.2%~152.2%。研究区内砂粒和粉粒含量的变化范围较大,黏粒的变化范围

最小。根据变异程度分级,砂粒空间分布具有强变异性,粉粒和黏粒空间变异程度为中等变异性,变异性强弱为砂粒>黏粒>粉粒。

研究区土壤水带中,0~0.3 m 内各土体颗粒的空间变异性最弱,0.6~0.9 m 变异性最强。垂向上土质地变异性与深度呈正相关关系,随着土层深度的增加,土体颗粒的变异系数逐渐增大,变异性逐渐增强。其中砂粒的空间变异性在 0.6 m 内随深度增强显著,后趋于平缓;粉粒和黏粒的变异性随深度增强较为平缓,但随深度增加变异性增强变显著。

为进一步分析土壤水带土质地的变异性特征和分布规律,根据土体颗粒的偏度、峰度计算和单样本 K-S 检验来判断土壤砂粒、粉粒和黏粒数据是否符合正态分布。研究区内土质地的数据检验结果显示,0~0.3 m 和 0.3~0.6 m 深度内,粉粒的分布符合正态分布,砂粒和黏粒的分布符合对数正态分布;0.6~0.9 m 内砂粒和黏粒的分布符合对数正态分布,而粉粒分布在该深度内不满足正态分布。

表 1 不同土体深度上砂粉黏的分布特征

Tab.1 Distribution characteristics of sand, silt and clay in different soil depths

颗粒	土层/m	最小值 /%	平均值 /%	最大值 /%	标准差 /%	变异 系数/%	偏度	峰度	K-S
砂粒	0~0.3	0.0	10.14	66.7	13.53	133.4	2.329	6.07	0.20
	0.3~0.6	0.0	8.97	74.0	13.6	151.6	2.49	8.21	0.09
	0.6~0.9	0.0	10.30	74.0	15.67	152.2	2.188	5.22	0.05
粉粒	0~0.3	33.3	78.90	96.8	12.80	16.2	-1.149	2.06	0.20
	0.3~0.6	26.0	77.55	96.7	13.33	17.2	-1.184	2.61	0.05
	0.6~0.9	26.1	78.45	96.6	15.54	19.8	-1.119	1.26	0.01
黏粒	0~0.3	0.0	10.88	31.4	8.84	81.2	0.877	-0.51	0.20
	0.3~0.6	0.0	13.32	51.4	11.71	88.0	1.219	1.17	0.05
	0.6~0.9	0.0	11.07	51.4	12.75	115.2	1.66	1.66	0.05

表 2 不同土层土体砂粉黏的半方差函数分析

Tab.2 Semi-variance function analysis of sand, silt and clay viscosity in different soil layers

颗粒	土层/m	模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	变程/m	块基比 $C_0 / (C_0 + C)$	残差	决定系数 R^2
砂粒	0~0.3	高斯模型	91.8	253.7	4 191.6	0.36	657	0.95
	0.3~0.6	球状模型	68.9	279.8	1 106	0.24	2 476	0.68
	0.6~0.9	球状模型	88.7	247.9	1 477	0.35	1 640	0.80
粉粒	0~0.3	球状模型	55.8	153.5	1 350	0.36	142	0.95
	0.3~0.6	球状模型	79.5	171.4	1 597	0.46	520	0.83
	0.6~0.9	—	—	—	—	—	—	—
黏粒	0~0.3	球状模型	11.9	100.7	2 271	0.11	319	0.92
	0.3~0.6	高斯模型	21.5	158.3	961.3	0.13	1 874	0.65
	0.6~0.9	球状模型	18.6	158.1	1 353	0.11	2 592	0.63

2.2 地统计分析和半方差函数模型选择

通过半方差分析可以有效刻画出变量在空间分布中所具有的随机性和结构性特征,本次在描述性统计分析的基础上进一步利用半方差计算对土壤水带质地的空间结构进行研究。

采用 GS+9.0 软件对土壤水带不同深度处砂粒、粉粒、黏粒构成进行半方差函数分析,并通过块基比计算说明研究区土壤水带土体质地空间相关程度的尺度。半方差计算结果显示,研究区土体质地的 $C_0/(C_0 + C)$ 值介于 0.11~0.46 之间,说明研究区内空间相关性强度黏粒>砂粒>粉粒。其中黏粒在空间上具有强相关性;粉粒具有中等空间相关性;砂粒在 0.3~0.6 m 深度内具有强相关性,0~0.3 m 和 0.6~0.9 m 则具有中等相关性。基台值 ($C_0 + C$) 随土层深度和粒径的增大均有相应的增大趋势,其中黏粒的增加幅度较为明显,也说明黏粒的空间相关程度较强。

在空间相关性分析的基础上,在 GS+9.0 中导入试验点位置信息和土体颗粒数据,拟合实验变异函数的分布曲线,分别获取砂粒、粉粒和黏粒含量在 0~0.3 m、0.3~0.6 m 及 0.6~0.9 m 深度内分布的半方差图,如图 2 所示。从图中可以看出,同一深度不同粒度的空间变异相关程度具有差异,且粒度含量的偏基台值 C 均大于块金值 C_0 ,表

明随机性因素对空间变异性的影响较小,拟合模型可较好地反映各土层土壤中砂粒、粉粒和黏粒的空间分布特征。

决定系数 R^2 ,也称为拟合优度,其值越大,表明自变量对因变量的解释程度越高,自变量引起的变动占总变动的百分比高,则模型拟合度越好。本次通过对比土壤水带质地参数的 R^2 、 C_0 筛选确定土壤水带土体质地的空间分布最优模型。根据表 2 中结果,土壤水带上层 0~0.3 m 中土体颗粒拟合程度最高,在空间相关性强度一致时,随着深度的增加,决定系数变小,拟合度降低。经拟合和验证,研究区 0~0.3 m 深度内,粉粒和黏粒的空间分布最优模型为球状模型,砂粒的空间分布最优模型则为高斯模型。在 0.3~0.6 m 土层中,砂粒和粉粒的空间分布最优模型为球状模型,而黏粒的半方差最优模型为高斯模型。在 0.6~0.9 m 深度内,砂粒及黏粒的空间分布最优模型为球状模型。

2.3 土体质地空间分布特征

为更直观地反映研究区土壤水带土体质地的空间分布情况,采用 Voxler 软件对砂粒、粉粒、黏粒含量数据进行克里格插值,并构建土壤水带三维模型。研究各粒度含量高值分布的三维透视模型如图 3 所示。由图 3 可见,研究区土体颗粒含量

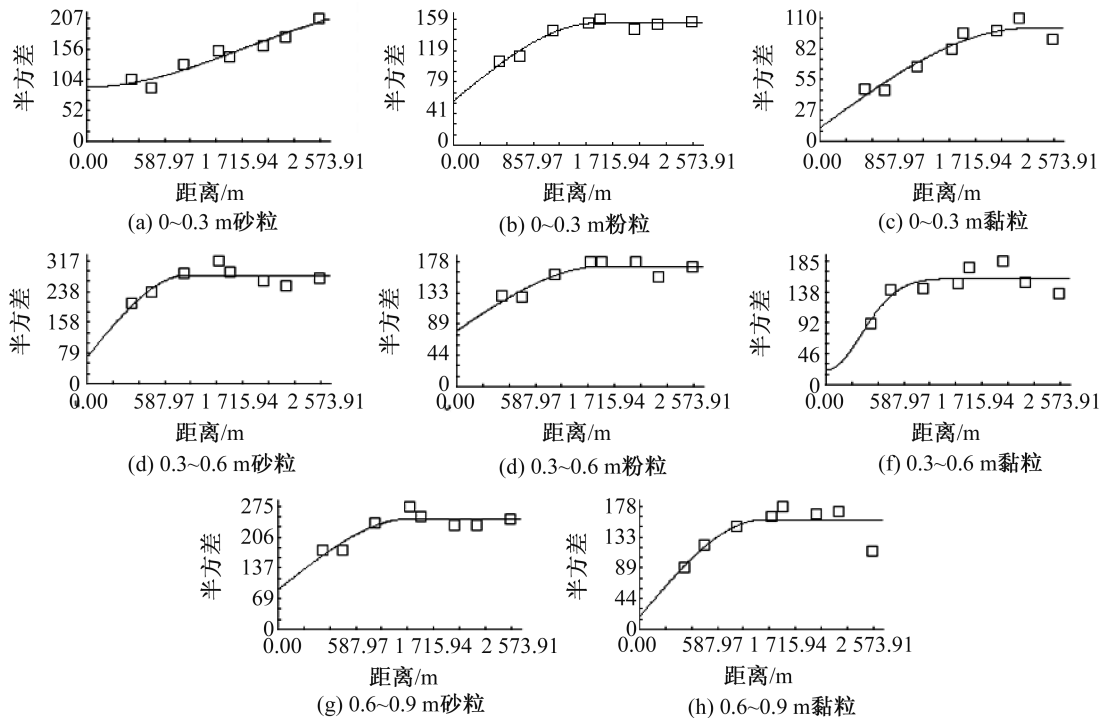


图 2 不同土层土体砂粉黏粒变异函数图

Fig. 2 Semi-variogram of sand, silt and clay viscosity in different soil layers

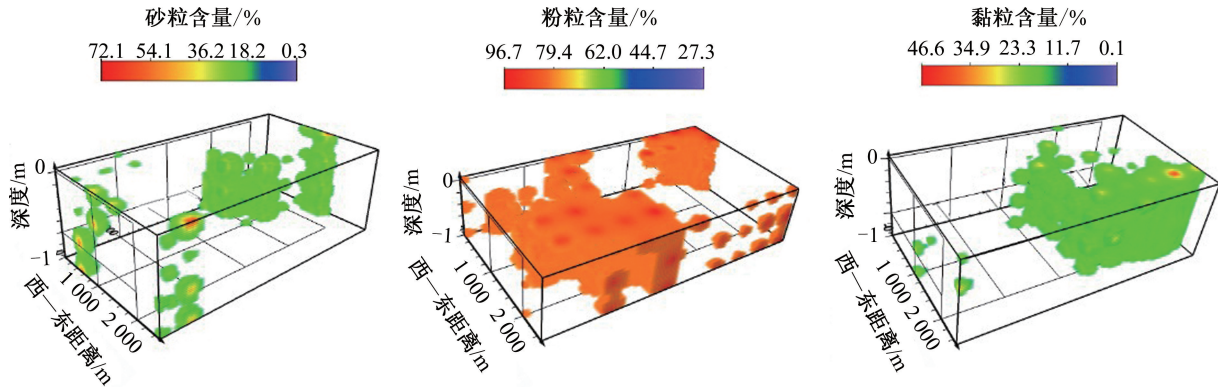


图 3 土壤水带砂粒、粉粒、黏粒含量高值分布透视图

Fig. 3 Perspective of the distribution of high content of sand, silt and clay in soil water zone

及分布范围中粉粒>黏粒>砂粒。研究区粉粒、黏粒高值分布非常集中,砂粒高值分布相对分散,且各粒度含量高值均表现以采样点为中心向四周辐射扩散分布的特征。

为更加清晰地说明不同深度土体颗粒的空间分布特征,在每一取样深度中点位置处(0.15、0.45及0.75 m)对土体砂粉黏土体模型进行切片,如图4—图7所示。土体模型切片图显示,研

究区土壤水带机械组成在不同深度的剖面上是基本一致的,具体表现为砂粒含量在研究区的西北部呈现出较高的趋势,在研究区其他大部分地区均较低;而在研究区的中北部中心地区,粉粒含量相对较低,在南部及西北角,含量均较高;黏粒含量呈现出沿东南方向上分布较高,东北和南部两块地区上分布低的趋势,且含量较高的区域均大致位于研究区范围的西北区域。

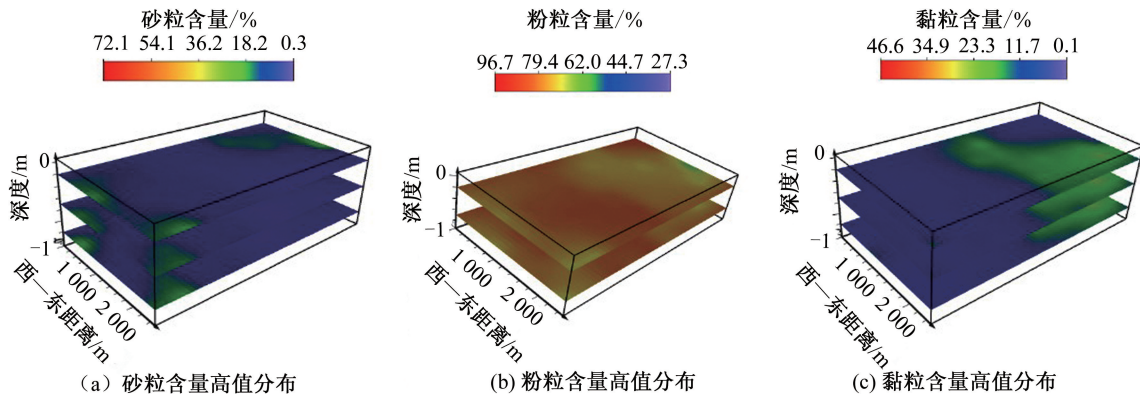


图 4 土体砂粒、粉粒、黏粒切片模型

Fig. 4 Slice models of soil for sand, silt and clay

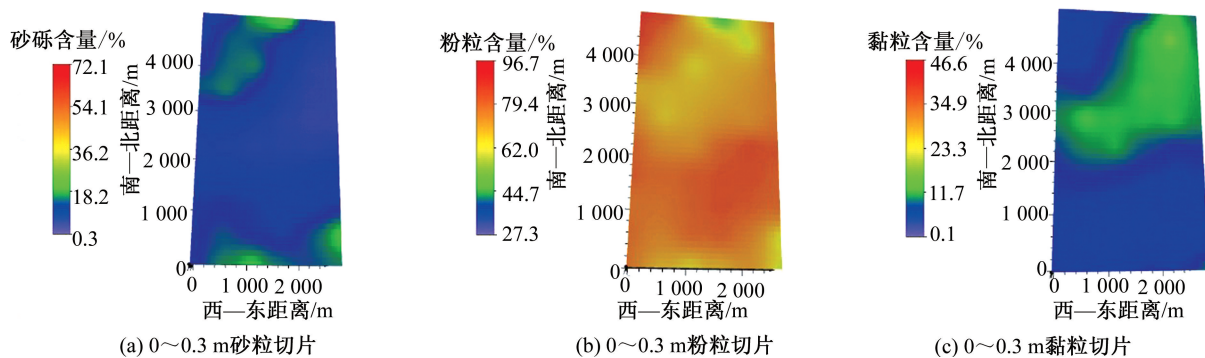


图 5 0~0.3 m 土层切片图

Fig. 5 Slices of soil from 0 m to 0.3 m in depth

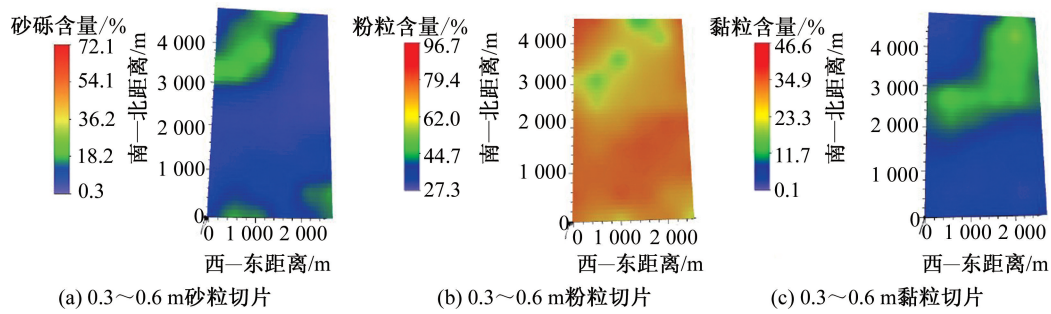


图 6 0.3~0.6 m 土层切片图

Fig. 6 Slice models of soil from 0.3 m to 0.6 m in depth

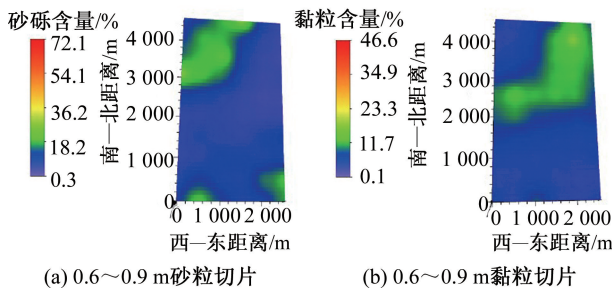


图 7 0.6~0.9 m 土层切片图

Fig. 7 Slice models of soil from 0.6 m to 0.9 m in depth

3 讨论

研究区土壤水带土体性质的空间变异性的地统计分析结果表明,土壤各种颗粒成分随土层深度呈现波动变化,但变幅较小。研究区土壤水带中三种粒级颗粒在空间上的变异系数均大于10%,说明研究区内土壤质地具有较强的变异性,区内土壤质地空间上的均质性较差。在不同深度处土壤质地的变异程度有所差异,随着深度的增加,土壤颗粒的变异程度逐渐增强。

根据研究区内砂粒、粉粒和黏粒的 $C_0/(C_0+C)$ 值显示,土体颗粒空间分布具有较强的空间自相关性,其中由随机性因素引起的变异性占总变异性的20%~30%,由结构性因素引起的变异性占比70%~80%,不同深度处土体性质的空间变异性均受结构性因素影响为主,而受随机性因素影响较小。上述研究结果与刘付程对苏南典型地区河湖沉积相土壤颗粒的空间变异特征分析^[26]、赵明月等^[27]对内蒙古河套灌区解放闸灌域土壤质地研究结果、曹媛等^[28]对宁夏中部不同土层的土壤质地研究结果、高君亮等^[29]对戈壁地表土壤颗粒的空间变异特征研究结果具有一致性。这也说明由于研究区位于黄河下游冲积平原,受黄河冲刷强

烈,该区域的土壤母质和河流冲刷侵蚀是影响其土壤颗粒空间分布变异的主要结构性因素,而灌溉、土地利用类型等人为活动等随机性因素对研究区土壤质地分布的影响较小。

4 结论

1) 研究区土壤颗粒组成以粉粒为主,砂粒和黏粒的平均含量差别不大。经典统计学分析结果表明研究区不同粒径颗粒的空间变异性差异较大,砂粒表现为强变异,粉粒表现为中等变异,而黏粒在不同深度变异性有所差异,浅层和中深层为中等变异,深层则为强变异。随土壤水带深度的增加,土壤水带土体性质的变异性逐渐增强,反映出研究区河湖相沉积的特征,同时也受到黄河河道摆动的影响。

2) 研究区土体颗粒具有较强的空间自相关性,而其变异因素主要由结构性因素引起的。不同深度土体颗粒最适应模型有所差异,砂粒在浅层空间分布最优模型为高斯模型,在中层和深层则最适用于球状模型;粉粒在浅层和中层空间分布最优模型均为高斯模型;黏粒则是浅层和深层的空间分布最优模型为球状模型,中层为高斯模型。

3) Krigin 差值结果更加直观揭示出研究区内三种颗粒的分布范围:粉粒>黏粒>砂粒,区内粉粒、黏粒高值分布范围集中,砂粒高值分布相对分散,粒度含量高值均表现以采样点为中心向四周辐射扩散的分布特征。

参考文献:

- [1] 谭丽丽,潘英华,谷晓岩,等. 土壤理化性质空间变异性研究进展[J]. 鲁东大学学报(自然科学版),2016,32(4):372-378.
- [2] AGHASI B, JALALIAN A, KHADEMI H, et al. Sub-

- basin scale spatial variability of soil properties in Central Iran[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10(136): 1-8.
- [3] 黄绍文,金继运,杨俐苹,等. 粮田土壤养分的空间格局及其与土壤颗粒组成之间的关系[J]. *中国农业科学*, 2002(03): 297-302.
- [4] DONALD M R, HAZELTON P A, CLEMENTS A M. Potential for using soil particle-size data to infer geological parent material in the Sydney region[J]. *Soil Research*, 2013, 51(4): 301-310.
- [5] 张景略,苗付山. 黄泛平原不同质地土壤的持水特性[J]. *土壤学报*, 1985(04): 350-356.
- [6] 田佳倩,周志勇,包彬,等. 农牧交错区草地利用方式导致的土壤颗粒组分变化及其对土壤碳氮含量的影响[J]. *植物生态学报*, 2008(03): 601-610.
- [7] 张振国. 土壤抗侵蚀指标的建立及初步应用[D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010.
- [8] 张淑娟,何勇,方惠. 基于GPS和GIS的田间土壤特性空间变异性的研究[C]. 中国农业机械学会成立40周年庆典暨2003年学术年会论文集. 北京:中国农业机械学会, 2003: 69.
- [9] 王德,傅伯杰,陈利顶,等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析——以黄土丘陵沟壑区为例[J]. *生态学报*, 2007(07): 3081-3089.
- [10] 管孝艳,杨培岭,任树梅,等. 基于多重分形理论的壤土粒径分布非均匀性分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, 17(02): 196-205.
- [11] 茹豪,张建军,李玉婷,等. 黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(04): 176-182.
- [12] CAMPBELL J B. Spatial variation of sand content and pH within single contiguous delineations of two soil mapping units [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, 42(03): 460-464.
- [13] CERRI C E P, BERNOUX M, CHAPLOT V, et al. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: Basis for selecting an agronomic experimental area. [J]. *Geoderma*, 2004, 123(1-2): 51-68.
- [14] PAN F, PETERS-LIDARD C D, KING A W. Inverse method for estimating the spatial variability of soil particle size distribution from observed soil moisture [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2010, 15(11): 931-938.
- [15] 雷志栋,杨诗秀. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. *水利学报*, 1985, 09(02): 10-19.
- [16] 刘小燕,朝伦巴根,刘廷玺,等. 非饱和带岩性平均粒径的空间变异性研究[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(04): 94-99.
- [17] 郭凌俐,王金满,白中科,等. 黄土区露天煤矿排土场复垦初期土壤颗粒组成空间变异分析[J]. *中国矿业*, 2015, 24(02): 52-59.
- [18] 李焕弟,李江,刘永,等. 内蒙古河套灌区土壤性质空间变异性分析——以解放闸灌域和永济灌域为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(06): 215-221.
- [19] 王冬冬,高磊,陈效民,等. 红壤丘陵区坡地土壤颗粒组成的空间分布特征研究[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 361-367.
- [20] 湛江,李志萍,于小朋. 黄河下游冲积平原典型区包气带土壤水分特征曲线的模型优选[J]. *人民黄河*, 2022, 44(12): 147-153.
- [21] 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(06): 1585-1591.
- [22] 于冬雪,贾小旭,黄来明,等. 黄土区不同土层土壤容重空间变异与模拟[J]. *土壤学报*, 2019, 56(01): 55-64.
- [23] ROSSI R E, MULLA D J, JOURNEL A G, et al. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence [J]. *Ecological Monographs*, 1992, 62(2): 277-314.
- [24] CAMBARDELLA C A, MOORMAN T B, NOVAK J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [25] 张正贵,韩迎春,冯璐,等. Voxler软件在棉田土壤含水量时空变异研究中的应用[J]. *中国棉花*, 2020, 47(12): 15-18.
- [26] 刘付程,史学正,潘贤章,等. 苏南典型地区土壤颗粒的空间变异特征[J]. *土壤通报*, 2003, 34(4): 246-249.
- [27] 赵明月,赵文武,刘源鑫. 不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因子——以黄土丘陵沟壑区为例[J]. *生态学报*, 2015, 35(14): 72-79.
- [28] 曹媛,孟明,王磊,等. 宁夏中部干旱带天然草地土壤颗粒空间分布特征[J]. *水土保持*, 2021, 4(2): 56-59.
- [29] 高君亮,高永,吴波,等. 戈壁地表土壤颗粒的空间变异特征研究[J]. *土壤*, 2019, 51(1): 135-141.

(责任编辑 王利君)