# 关中平原农田土壤水力参数空间分异与模拟

牛晓倩1,2, 贾小旭1,2, 刘成功1,2, 邵明安1,2, 赵春雷1

(1.中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室,北京 100101; 2.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100190)

摘要:土壤水力参数是土壤水分和污染物迁移等陆面过程数值模拟的重要基础参数。为探明关中平原农田土壤水力参数空间分异特征,建立空间分布预测模型,在关中平原网格布设 124 个样点,采集根层 0-20 cm 原状和扰动土壤样品,利用 van Genuchten 模型拟合获取土壤水分特征曲线,获得残余含水量  $(\theta_r)$ 、饱和含水量  $(\theta_s)$ 以及系数  $\alpha$  和 n 等土壤水力参数。采用经典统计学、地统计学和结构方程方法分析了  $\theta_r$ 、 $\theta_s$ 、 $\alpha$  和 n 的空间变异特征及影响因子,建立了水力参数传递函数预测模型。结果表明: $\theta_r$  和  $\alpha$  为强变异, $\theta_s$  为中等变异,n 为弱变异。 $\theta_r$ 、 $\alpha$  和  $\alpha$  半方差函数最佳拟合模型分别为球状模型、指数模型、指数模型和球状模型。 $\theta_s$  和  $\alpha$  具有强烈的空间依赖性,变程分别为 32.7,54.3 km; $\theta_r$  和  $\alpha$  具有中等程度空间依赖性,变程均为 52.8 km。土壤质地、容重、pH、有机质和海拔是影响土壤水力参数空间分布的主要因子。基于土壤理化性质和海拔建立的水力参数传递函数模型具有较好的模拟效果,可用于关中地区大尺度农田生态系统土壤水力参数的模拟预测。

关键词:关中平原;土壤水分特征曲线;水力参数;结构方程模型;传递函数模型

中图分类号:S152.7 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2021)01-0198-07

**DOI**:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.029

# Spatial Variations and Simulations of Farmland Soil Hydraulic Parameters in the Guanzhong Plain

NIU Xiaoqian<sup>1,2</sup>, JIA Xiaoxu<sup>1,2</sup>, LIU Chenggong<sup>1,2</sup>, SHAO Mingan<sup>1,2</sup>, ZHAO Chunlei<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; 2.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: Soil hydraulic parameters are critical to the numerical simulation of land surface processes such as soil moisture and pollutant transport. This study aimed to explore the spatial variation characteristics and influencing factors of soil hydraulic parameters, and then simulated these parameters through indirect method in classic cultivated area. A total of 124 sampling sites were set up in the Guanzhong Plain area, and undisturbed and disturbed soil samples at the depth of 0-20 cm were collected separately at each sampling site. Soil retention curve was estimated by the van Genuchten (VG) model and the hydraulic parameters (i.e.  $\theta_r$ , residual water content;  $\theta_s$ , saturated water content;  $\alpha$  and n, shape coefficients) of the VG model were calculated. Classical statistics, geostatistical and structural equation methods were used to determine the spatial variation characteristics and influencing factors of  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$  and n, and the prediction model of hydraulic parameter pedo-transfer functions was established. The results showed that the variability of n and  $\theta_s$  was weak and moderate, respectively; while  $\theta_r$  and  $\alpha$  had strong variability. Semi-variance functions of  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ and n could be best fitted by the spherical model, the exponential model, the exponential model and the spherical model, respectively.  $\theta_s$  and n exhibited strong spatial dependence, with the range of 32.7 and 54.3 km, respectively.  $\theta_r$  and  $\alpha$  exhibited moderate spatial dependence, with the range of 52.8 and 52.8 km, respectively. Soil texture, bulk density, pH, organic matter and elevation were the main direct factors affecting soil hydraulic parameters. The pedo-transfer functions model of hydraulic parameters based on soil physical and chemical properties and elevation had good simulation effect, and could be used to simulate and predict soil hydraulic parameters of large-scale farmland ecosystem in the Guanzhong area.

收稿日期:2020-07-21

**资助项目:**中国科学院战略性先导科技专项(XDB40020305);国家自然科学基金项目(41877016)

第一作者:牛晓倩(1996—),女,硕士研究生,主要从事环境污染风险评估与控制研究。E-mail; sdnxiaoqian@163.com

通信作者:贾小旭(1985—),男,博士,研究员,主要从事区域土壤水文过程及其生态效应研究。E-mail:jiaxx@igsnrr.ac.cn

**Keywords:** the Guanzhong Plain; soil water retention curve; soil hydraulic parameters; structural equation model; pedo-transfer functions

模型是研究不饱和土壤中水分运动及污染物迁移 的有效工具[1-2],其中土壤水力参数是预测土壤水分动 态分布的重要参数。由于气候环境、地质条件、土壤性 质等的不同,不同地区土壤物理、化学和生物过程有显 著差异,进而使土壤水力参数在一定尺度上具有明显的 空间异质性[3]。了解土壤水力参数的空间变异和分布 特征对模拟包气带水分运输和溶质运移过程十分重要, 已有不少学者[2-5]对土壤水力参数空间变异性进行了研 究,取得了重要进展。目前土壤水分特征曲线主要依 靠田间采样结合室内分析获得,溶质运移和水文过程 模拟等领域应用最广泛的土壤导水特性模型是 van Genuchten 模型(VG 模型),因其适用条件广、拟合 效果好而得到广泛应用[6]。然而,利用试验测定土壤 水分特征曲线拟合 VG 模型中参数,获得非饱和土壤 的含水率耗时费力,在较大空间研究尺度上难以实 现[1.7],快速而准确获取土壤水分运动参数是长期困 扰土壤水文过程和污染物迁移等领域的难题。根据 易于测定的土壤基本理化参数建立预测模型,以间接 获得土壤水力参数,将极大地便利土壤水分过程模拟 和污染物运移方面的科学研究[1]。

确定不同地区土壤水力参数的影响因子,建立基于易获得土壤性质的传递函数方程已被广泛用于大尺度土壤水力参数的模拟和预测 $[^{7-9}]$ 。常见的传递函数模型构建方法包括线性回归、非线性回归、人工神经网络等。Li等 $[^{7}]$ 在华北平原封丘县利用多元回归建立了 $\theta_s$ 、 $\alpha$ 和n的传递函数方程,并将建立的传递函数应用于作物产量估算;胡振琪等 $[^{9}]$ 利用人工神经网络,基于土壤质地、容重和饱和含水量,对徐州矿区复垦土壤的 $\theta_s$ 、 $\alpha$ 和n进行了预测。然而,传递函数模型具有明显的地域局限性 $[^{10}]$ 。因此,针对特定区域建立不同的传递函数方程十分必要。

关中平原地区是华夏文明重要发祥地,已有上千年的耕作历史,是我国的重要粮食产区。关中平原城市群在国家现代化建设大局和全方位开放格局中具有独特战略地位。关中地区地势平坦,土质肥沃,是农业生产的集中区域,人类活动强度大,同时该区也面临着生态系统脆弱、农田质量退化、地下水硝酸盐污染等生态环境问题[11]。土壤水力参数因土地利用类型的不同而具有显著差异。农地具有人类活动频繁、土壤受干扰大的特点,粪肥施用、精耕细作、秸秆还田等对耕层土壤理化性质产生了重要影响[12]。由于农地管理措施的差异,其土壤水力参数可能具有更明显的空间异质性;同时,也增加了农田土壤水力参

数模拟预测的难度。Wang 等[2]研究了辽宁省西部不同尺度农地土壤水力参数的空间变异特征及影响因素,并发现土壤水力参数空间变异特征受研究尺度的显著影响。量化区域尺度农地土壤水力参数的空间变异性,建立区域农田土壤水力参数预测的传递函数模型,对农田土壤水文过程模拟与管理具有重要意义,也将为地下水保护、土壤污染治理及精准农业等研究提供基础参数。

为此,本研究以关中平原农田生态系统为对象,通过网格布设 124 个农地样点,采集作物根层 0-20 cm 原状和扰动土壤样品,利用 VG 模型拟合获取土壤水分特征曲线及  $\theta_r$ 、 $\theta_s$ 、 $\alpha$  和 n 等水力参数,采用经典统计学和地统计学方法分析水力参数的空间变异特征,利用结构方程模型确定土壤水力参数空间分异的主要影响因子,建立土壤水力参数的传递函数模型,以期为关中地区农田土壤水文过程模拟和养分管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

选择关中平原地区作为试验地点。关中平原地区 位于陕西省中部(东经 106°43′-110°31′,北纬 34°02′-35°34′),包括西安、宝鸡、咸阳、渭南、铜川、杨凌5市 1区(图1),是典型的新生代断陷盆地。盆地内堆积 了近千米的第四纪松散层,主要土壤类型为褐土、潮 土、塿土等。关中平原地势由渭河两岸向南北山前呈 阶梯状抬升,地貌类型分别为冲积平原、黄土台塬、山 前洪积扇。其地势相对平坦,地下水位较低,光、热资 源丰富,土壤质量好,是我国重要的粮食产区。土地 利用类型主要为耕地,以冬小麦和夏玉米轮作为主, 多为1年2季,部分地区因土质、水热适宜,近年来开 始发展规模化果树种植,如眉县、礼泉县、大荔县等。 除西部部分地区不具备灌溉条件外,研究区多以地下 水或渠水作为农业灌溉用水,多采用机械化耕作。关中 地区属大陆性季风半湿润气候,年平均气温 12.9 ℃, 年平均降水量 500~700 mm。

## 1.2 试验设计

2018年12月至2019年2月,对关中平原地区典型农田生态系统进行网格(20 km× 20 km)布点采样,总计布设124个样点,样点分布见图1。为了避免道路对样地的影响,每个采样点距道路距离在500 m以上。利用手持式GPS记录样点的经纬度和海拔。分别利用100 cm³环刀和土钻采集表层原状和扰动土壤样品,为减少外界干扰,原状和扰动土样

均从距地表 10 cm 深度处开始取样,获得 10-15 cm 原状土和扰动土,以代表表层 0-20 cm 土壤。将原 状土壤样品带回实验室,测定土壤容重和土壤水分特 征曲线。扰动土壤样品风干后过 2,0.25 mm 筛,分 别用干测定土壤颗粒组成、pH 和有机质。利用高速 冷冻离心机(HITACHI, CR21G, 日本)测定不同水 吸力下的土壤含水量,利用马尔文激光粒度仪 (Malvern Panalytical, MS2000, 英国)测定土壤颗粒 组成,利用高锰酸钾外加热法测定土壤有机质含量, 利用玻璃电极法测定土壤 pH。



关中平原地区位置及采样点分布

## 1.3 研究方法

1.3.1 土壤水分特征曲线拟合 利用 van Genuchten 模型对土壤水分特征曲线进行拟合,获得各土壤 水力参数 $(\theta_r, \theta_s, \alpha, \pi_n)$ ,其数学表达式为:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha h|^n\right]^m} \tag{1}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} (0 < m < 1) \tag{2}$$

式中: $\theta$  为体积含水量(cm³/cm³); $\theta$ ,为残余含水量 (cm³/cm³);θ<sub>s</sub>为饱和含水量(cm³/cm³);h 为压力水 头(cm);  $\alpha$  为与进气吸力相关的参数(1/cm); n 和 m为水分特征曲线形状系数。

1.3.2 土壤水力参数空间变异分析 利用经典统计 和地统计方法分析水力参数的空间变异特征。经典 统计学中某一变量空间变异程度用变异系数(CV)表 示,其计算公式为:

$$CV = \frac{S}{x} \tag{3}$$

式中 $\cdot S$  为标准偏差 $\cdot x$  为平均值。根据变异程度分 级,CV≤0.1 为弱变异性,0.1<CV<1 为中等变异 性,CV≥1时为强变异性[13]。

地统计学方法综合考虑了空间变量的随机性和 结构性特征,是土壤变异性分析最常用的定量工具, 也是确定土壤水力特性的空间相关性的常用方法。 利用半方差函数分析计算空间变量的变异模式,半方 差函数的计算公式为:

$$\lambda(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2 \quad (4)$$

式中: $\lambda(h)$ 为半方差函数值;N(h)为距离为h的数据点 的对数; $Z(x_i)$ 为随机变量 Z 在  $x=x_i$ 处的实测值;  $Z(x_i+h)$  为随机变量 Z 在  $x=x_i+h$  处的实测值。

根据半方差函数模型,可得到块金值( $C_0$ )、基台 值 $(C_0+C)$ 、变程(A)3个重要特征值,用于空间异 质性和变异尺度范围的分析[14]。 C。表示随机部分 产生的空间异质性, C是系统变异产生的空间异质 性。 $C_0/(C_0+C)$ 为空间异质比,定量描述了随机变 异在总变异中所占的比例,是描述空间依赖性的重要 指标。按照 Cambardella 等[15] 的划分标准,当 C<sub>0</sub>/  $(C_0 + C) \le 25\%$ 时,空间依赖性强, $25\% < C_0/(C_0 +$ (C)<75%时为中等空间依赖性, $(C_0/(C_0+C))$ </br> 时空间依赖性较弱。A 表示研究变量空间自相关变 异的尺度范围,变程越小,参数在空间上的相互作用 距离就越小,则变异性越大,样点间距超过变程时,可 认为不具有相关性[16]。

克里格插值是地统计学常用的一种插值方法,通过 对点或区域进行最优线性无偏估计,给出估计区域的模 拟值[15]。根据半方差分析结果,本研究采用普通克里格 插值方法获得各土壤水力参数的空间分布图。

1.3.3 结构方程模型 结构方程模型通过构建各潜 在影响因素间的作用关系,直观地揭示变量间的相互 作用,被广泛用于土壤学和生态学研究[17]。应用结 构方程模型分析土壤水力参数的影响因子,将海拔、 土壤容重、pH、土壤质地(黏粒、粉粒、砂粒)、土壤有 机质作为潜在变量进行分析。模型采用最大似然法 进行拟合,并根据拟合效果对模型进行修正。利用参 数对数转换和 bootstrap 法以解决模型的非多元正 态分布问题。选择卡方值 χ²、ρ 值、拟合优度指数 (GFI)和近似均方根误差(RMSEA)作为评价指标。 1.3.4 传递函数方程的构建及评价 将各参数相关 因子及其常见转换形式作为自变量构建传递函数方 程。其中,70%(87个样点)的样点数据用于构建传 递函数方程,30%(37个样点)的样点数据用于模型 验证。选取均方根误差(RMSE)和平均误差(ME)作 为模型精度的评价指标,各评价指标计算方法为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (y_{i} - \hat{y}_{i})^{2}}{N}}$$
 (5)

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{N} (y_i - \hat{y}_i)}{N}$$
 (6)

式中:N 为用于模拟的样本数; $\gamma$ ,为测量值; $\hat{\gamma}$ ,为预 测值。

1.3.5 数据处理及分析方法 本研究利用 RETC 软 件对土壤水分特征曲线进行拟合并获取 VG 模型相关 参数。描述性统计分析及逐步多元回归在 SPSS 20.0 中

进行。利用 GS<sup>+</sup> 9.0 软件进行半方差分析,利用 Arc-GIS 10.2 进行克里格插值,并绘制土壤水力参数空间分布图。结构方程模型在 AMOS 22.0 中构建。

# 2 结果与分析

## 2.1 土壤水力参数基本统计特征

VG 模型对 124 个样点土壤水分特征曲线均具 有较好的拟合效果(R<sup>2</sup>>0.99),因此 VG 模型可适用 于关中农田土壤水力参数的拟合,这与 Wang 等[3]利 用VG模型分析整个黄土高原地区土壤水力参数的 结果一致。已有研究[18] 表明, VG 模型对粗质地土壤 的拟合效果较差,而关中地区位于黄土高原南部,土 壤黏粒含量高,其拟合效果较好,说明 VG 模型适用 于质地较细土壤的水力参数拟合。由表1可知,关中 地区 0-20 cm 土层土壤水力参数  $\theta_r$ 、 $\theta_s$   $\alpha$  和 n 的平 均值分别为 0.01 cm³/cm³, 0.48 cm³/cm³, 0.15 /cm 和 1.19, 变化范围分别为 0~0.16 cm³/cm³, 0.37~ 0.73 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,0~1.29 /cm 和 1.10~1.53。根据变 异系数 CV 可知,参数 n 具有弱变异特征, $\theta$ 。为中等 变异性, $\theta$ ,和α为强变异性,这与刘继龙等[5]在陕西 杨凌地区的研究结果相似。研究区土壤容重、有机 质、砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量平均值分别为1.24 g/cm³,18.24 g/kg,8.76%,61.12%和 30.12%,以上 各土壤物理属性均为中等变异性。

表 1 土壤水力参数及土壤物理属性的描述性统计特征

指标	最小值	最大值	平均值	标准偏差	变异系数
$\theta_r/(\mathrm{cm}^3 \cdot \mathrm{cm}^{-3})$	0	0.16	0.01	0.03	2.07
$\theta_s/(\mathrm{cm}^3 \cdot \mathrm{cm}^{-3})$	0.37	0.73	0.48	0.07	0.14
$\alpha/\mathrm{cm}^{-1}$	0	1.29	0.15	0.21	1.42
n	1.10	1.53	1.19	0.08	0.06
容重/(g•cm <sup>-3</sup> )	0.99	1.70	1.24	0.14	0.11
有机质/ $(g \cdot kg^{-1})$	8.48	32.65	18.24	4.78	0.26
砂粒含量/%	1.89	31.17	8.76	4.54	0.52
粉粒含量/%	47.42	73.15	61.12	3.34	0.50
黏粒含量/%	13.00	41.59	30.12	4.41	0.15

## 2.2 土壤水力参数地统计学空间变异

利用地统计半方差函数对各土壤水力参数空间变异性进行分析,结果见表 2。对于 VG 模型中的不同参数, $\theta$ ,和n 的最佳拟合模型均为球状模型, $\theta$ 。和 $\alpha$  的最佳拟合模型均为指数模型。参数  $\theta$ ,和n 块金值较小,表明由随机误差引起的空间异质性较小;空间异质比分别为 16.2%和 21.5%,具有强烈的空间依赖性。对于  $\theta$ ,和n,由于结构性变异在空间变异中占绝对的主导作用,可通过减小采样间距降低方差<sup>[16]</sup>。参数  $\theta$ ,和 $\alpha$  块金值较大,空间异质比分别为 36.8%和 50.0%,具有中等程度的空间依赖性。 $\theta$ 。的变程较小,为 32.7 km,表明其空间相互作用距离小;而  $\theta$ ,  $\alpha$  和n 的变程分别为 52.8,52.8,54.3 km,空间相互作用距离相较  $\theta$ 。更大。

表 2 土壤水力参数变异函数模型及相关指标

水力参数	最适模型	块金值	基台值	空间异质比/%	变程/km	决定系数	残差平方和
$\theta_r$	球状	0.0042	0.0113	36.8	52.8	0.657	1.85E-05
$ heta_s$	指数	0.0008	0.0047	16.2	32.7	0.445	1.98E-06
α	指数	0.8380	1.6770	50.0	52.8	0.448	2.29E-01
n	球状	0.0008	0.0038	21.5	54.3	0.689	2.86E-06

基于地统计半方差函数分析结果,利用普通克里格插值方法对 4 个水力参数进行空间插值,获得研究区土壤水力参数的空间分布图(图 2)。总体而言, $\theta$ , 呈东部和中部地区高,而西部地区较低的分布趋势,不同区域间具有明显的差异,这可能与结果中较多的零值有关; $\theta$ 。 具有明显的斑块状分布特征,空间上变化较为剧烈, $\theta$ 。 受到诸多环境因素尤其是土壤孔隙和结构的影响[19],不同的自然条件、耕作方式、管理模式等显著改变了表层土壤结构,造成其强烈变化的空间分布特征; $\alpha$  空间分布无明显的变化趋势,主要表现为东部和西部地区较高,而中部地区较低; $\alpha$  在东西方向上大致呈带状分布; $\alpha$ , 和 $\alpha$ ,  $\alpha$ , 和

#### 2.3 土壤水力参数影响因子

本研究利用结构方程模型分析了潜在影响因子与 4 个土壤水力参数之间的作用关系,结果见图 3。模型各评价指标均达到标准以上(p > 0.05, GFI $\geqslant$  0.95, RMSEA $\leqslant$  0.08)[20],具有良好的拟合效果。土

壤质地、pH、土壤有机质、容重和海拔对土壤水力参 数具有重要影响。从直接效应来看,砂粒含量和有机 质对  $\theta_r$ 分别具有显著的正效应和负效应( $\rho < 0.05$ ); 黏粒含量、pH、有机质对  $\theta$ 。具有正效应,而海拔和容 重具有负效应,其中容重、海拔和 pH 对  $\theta$ 。具有显著 作用;黏粒含量、pH 对  $\alpha$  具有正效应,而容重对  $\alpha$  具 有负效应,各影响因素中仅容重对 α 影响作用显著: n 受砂粒含量的正效应作用,而黏粒含量、有机质、容 重则具有负效应作用,砂粒、黏粒含量为n的显著影 响因子。土壤理化性质是水力参数预测的关键因子, 这与其他地区的研究[19]结果相符合。土壤持水能力 主要受到土壤颗粒孔隙和土粒吸附能力影响,这主要 与容重、有机质含量、质地尤其是黏粒含量有 关[18,21]。海拔除对 $\theta$ 。具有显著的直接影响外,还通 过作用有机质、黏粒、砂粒、容重及 pH 等土壤性质, 对各水力参数产生了明显的间接影响。因此,关中地 区农田生态系统土壤水力参数的空间分异特征受土

壤、地形等因子的共同影响。此外,决定系数 R<sup>2</sup>表 明,本研究构建的结构方程模型对 $\theta$ ,的解释度有限,

这可能与利用 RETC 软件拟合获得的  $\theta$ , 有过多的零 值有关,难以体现潜在因子对 $\theta$ ,的作用效应。

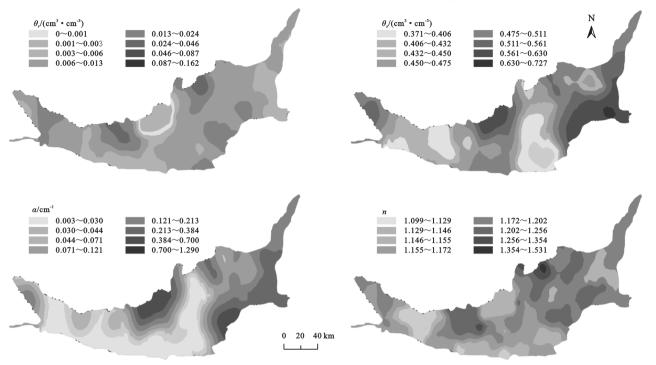
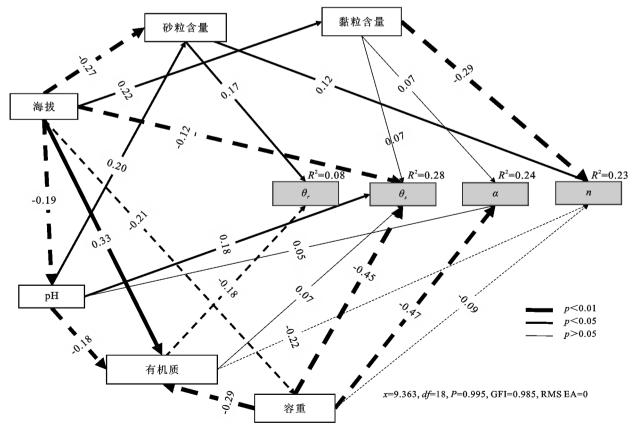


图 2 关中平原土壤水力参数空间分布

根据结构方程模型分析结果, $\theta$ ,和 n 均受到土壤质 地的显著影响(图 3),以关中平原东部地区为例,其土壤砂 粒含量高,颗粒相对较粗,造成 $\theta$ ,和n空间分布上东部地 区较高的趋势。容重通过影响土壤孔隙尤其是大孔隙数 量影响水分特征曲线变化,对 $\theta$ 。和 $\alpha$ 同时具有显著负效应 (图 3),造成其在空间分布上的一致趋势(图 2)。



注:左侧为潜在影响因子,箭头指向被作用变量,箭头上的数字代表标准路径系数,R<sup>2</sup>为模型对各水力参数的解释度,箭头实线和虚线分别代 表正向作用和反作用,箭头粗细表示作用强度。

图 3 关中平原土壤水力参数影响因子路径图

#### 2.4 传递函数预测模型

本研究利用结构方程模型中的主要影响因子作为自变量,通过多元逐步回归建立了 4 个水力参数的传递函数方程。所有方程均经过显著性检验,且均在p < 0.01 水平上显著(表 3)。由表 3 可知,对于关中农田生态系统,土壤质地是除 $\theta$ ,外的 3 个土壤水力参

数的重要预测因子,其中  $\theta_r$ 和 n 传递函数模型仅包含土壤质地。土壤容重也是预测土壤水力参数的重要变量,这与大多其他研究[22]建立的传递函数方程结果一致。土壤有机质、pH 和海拔仅在参数  $\theta_s$ 的传递函数方程中被作为输入变量。

表 3 关中平原地区土壤水力参数传递函数模型及预测精度

水力参数	传递函数方程	均方根误差	平均误差	Þ
$\theta_{\mathrm{r}}$	$\theta_r = -0.005 + 3.05 E - 05 \times Silt \times Sand + 0.008 \times cosSilt$	0.021	0	<0.001
$\theta_{\mathrm{s}}$	$\theta_s = 0.453 + 9.22E - 08 \times EL^2 + 0.002 \times pH \times SOM - 0.01 \times BD \times SOM$	0.058	-0.023	<0.001
α	$\alpha = -1.052 + 1.153 / BD + 0.000295 \times \text{Clay}^2$	0.172	0	< 0.001
n	$n = -1.633 + 18.953 / \text{Clay} + 0.025 \times \cos \text{ Silt} + 0.618 \times \ln \text{ Clay} + 0.025 \times \text{Sand}^{0.5}$	0.047	0.002	< 0.001

注:Clay 为黏粒含量(%);Silt 为粉粒含量(%);Sand 为砂粒含量(%);BD 为容重(g/cm³);SOM 为有机质含量(g/kg);EL 为海拔(m)。下同。

为检验本研究建立的传递函数方程的预测能力, 利用验证数据与其他研究<sup>[23-25]</sup>建立的水力参数传递 函数模型进行了对比分析(表 4)。结果表明,本研究 建立的传递函数模型 RMSE 和 ME 更低,即在研究 区具有更好的预测效果。

在其他传递函数模型中,Wösten等<sup>[23]</sup>利用 HYPRES数据库建立的水力参数模型预测效果最 好,HYPRES数据库收集了欧洲 12个国家的土壤数 据,数据更具有代表性。因此,增加采样数量、保证样 点足够的变异性有利于提高传递函数模型的拟合精度。 Qiao 等<sup>[24]</sup>针对黄土高原深层土壤(104.5~204.5 m)建立 了传递函数模型,虽然研究区域包含了关中平原,但 由于深层土壤和表层土壤的水力性质具有较大差异, 其传递函数对本研究数据的预测精度有限。Santra 等<sup>[25]</sup>基于印度小流域数据集建立的传递函数模型对 关中地区参数 α 仍有较好的预测能力,但对 n 拟合 效果较差,这可能与研究区不同,而导致土壤性质差 异变化较大有关<sup>[26]</sup>。因此,其他地区建立的水力参 数传递函数模型难以较好模拟预测关中地区所有 4 个土壤水力参数。

表 4 基于验证数据的新建立传递函数与已有传递函数的拟合精度

传递函数方程	输入参数	样本数	水力参数	均方根误差	平均误差
Qiao 等 <sup>[24]</sup>	BD, Sand, Clay, SOM	206	$ heta_{ m s}$	0.100	0.065
			α	0.254	0.149
	•		n	0.194	0.121
Wösten 等 <sup>[23]</sup>	BD, Silt, Clay, SOM		$ heta_{ m s}$	0.071	0.027
		4030	α	0.248	0.139
			n	0.096	0.027
Santra 等 <sup>[25]</sup>	BD, Silt, Clay, SOM, pH	100	α	0.228	0.102
			n	0.997	-0.969
本研究	BD, Sand, Silt, Clay, SOM, EL	124	$\theta_r$	0.041	0.010
			$ heta_{ m s}$	0.065	-0.008
			α	0.241	-0.050
			n	0.100	0.019

关中平原地处半湿润区,部分地区地下水位低,易发生土壤盐渍化。本研究发现,在渭南市、西安市部分地区均存在严重的土壤盐渍化现象,盐渍化对土壤水力参数可能产生重要影响。刘彩虹等<sup>[27]</sup>针对盐碱地土壤水力参数的研究发现,土壤全盐量对土壤基本物理性质具有显著影响,进而对水力参数产生间接作用。人类活动(如灌溉、施肥、耕作等)对耕层土壤也会产生强烈的扰动,使土壤结构和物质含量发生改变<sup>[19]</sup>,进而对土壤水力参数的模拟产生影响。因此,为提高土壤水力参数的模拟预测精度,未来可考虑将其他相关因子(如农田管理措施)引入传递函数方程<sup>[10]</sup>。本研究建立了具有一定精度的包含土壤理化性质和地形因子的

土壤水力参数传递函数模型,为关中平原区域大尺度 农田生态系统土壤水力参数预测提供了方法支撑,为 该区土壤水文及溶质迁移模拟预测提供了依据。

## 3 结论

本文量化了关中平原地区农田土壤水力参数  $\theta_r$ 、 $\theta_s$ 、 $\alpha$  和 n 的空间变异性,确定了土壤水力参数空间分异的主要影响因子,建立了相应的传递函数预测模型。结果表明, $\theta_r$  和  $\alpha$  为强变异, $\theta_s$  为中等变异,n 为弱变异。 $\theta_r$  和 n 半变异函数可用球状模型进行最优拟合, $\theta_s$  和 n 具有强烈的空间依赖性,变程分别为 32.7,54.3 km;  $\theta_r$  和  $\alpha$  具有中等程度空间依赖性,变程分别为 52.8,

52.8 km。关中地区农田土壤水力参数空间分异受土 壤理化性质和地形因子的共同影响,土壤质地、容重、 有机质、pH 是影响水力参数空间分异的主要因子, 而海拔通过作用土壤理化性质对水力参数产生间接 影响。本研究建立的传递函数模型对土壤水力参数 具有较好的预测效果,可用满足一定精度条件下区域 农田土壤水力参数空间分布的预测。

#### 参考文献:

- [1] Liu Z X, Shu Q S, Wang Z Y. Applying pedo-transfer functions to simulate spatial heterogeneity of cinnamon soil water Retention characteristics in western Liaoning Province [J]. Water Resources Management, 2007, 21 (10):1751-1762.
- $\lceil 2 \rceil$ Wang ZY, Shu QS, Liu ZX, et al. Scaling analysis of soil water retention parameters and physical properties of a Chinese agricultural soil [J]. Australian Journal of Soil Research, 2009, 47(8): 821-827.
- [3] Wang Y Q, Shao M A, Han X W, et al. Spatial variability of soil parameters of the van Genuchten Model at a regional scale [J].CLEAN - Soil, Air, Water, 2015, 43(2): 271-278.
- [4] Asim B, Bing C S. Spatial relationship between soil hydraulic and soil physical properties in a farm field [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2009, 89(4): 473-488.
- 刘继龙,马孝义,张振华.不同土层土壤水分特征曲线的空 [5] 间变异及其影响因素[J].农业机械学报,2010,41(1):46-52.
- [6] 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.
- Li Y, Chen D, White R E, et al. Estimating soil hy-[7] draulic properties of Fengqiu County soils in the North China Plain using pedo-transfer functions [J]. Geoderma,2007,138(3/4):261-271.
- [8] 姚姣转,刘廷玺,王天帅,等.科尔沁沙地土壤水分特征 曲线传递函数的构建与评估[J].农业工程学报,2014,30 (20):98-108.
- 胡振琪,张学礼.基于 ANN 的复垦土壤水分特征曲线的 [9] 预测研究[J].农业工程学报,2008,24(10):15-19.
- [10] Van L K, Bouma J, Herbst M, et al. Pedotransfer functions in earth system science: Challenges and perspectives [J]. Reviews of Geophysics, 2017, 55(4):1199-1256.
- Zhang X, Zhao W W, Wang L X, et al. Relationship be- $\lceil 11 \rceil$ tween soil water content and soil particle size on typical slopes of the Loess Plateau during a drought year [J]. Science of the Total Environment, 2019, 648: 943-954.
- 赵护兵,王朝辉,高亚军,等.陕西省农户小麦施肥调研  $\lceil 12 \rceil$ 评价[J].植物营养与肥料学报,2016,22(1):245-253.
- Wang Y Q, Shao M A. Spatial variability of soil physical properties in a region of the loess plateau of Pr China subject to wind and water erosion [J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(3): 296-304.

- Mirko C, Anna MS, Matteo T, et al. Spatial variability of soil physical and hydraulic properties in a durum wheat field: An assessment by the BEST-Procedure [J]. Water, 2019, 11(7): 1434-1453.
- [15] 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.
- [16] Flatman G T, Yfantis A A. Geostatistical strategy for soil sampling-the survey and the census [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1984, 4(4): 335-349.
- $\lceil 17 \rceil$ Brahim N, Blavet D, Gallali T, et al. Application of structural equation modeling for assessing relationships between organic carbon and soil properties in semiarid Mediterranean region [J], Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2011, 8(2): 305-320.
- [18] Han X W, Shao M A, Horton R. Estimating van Genuchten model parameters of undisturbed soils using an integral method [J]. Pedosphere, 2010, 20(1):55-62.
- [19] 杨欣坤,王宇,赵兰坡,等.土壤水动力学参数及其影响 因素研究进展[J].中国农学通报,2014,30(3):38-43.
- Sales M V S, Aleixo S, Gama-Rodrogues A C, et al. [20] Structural equation modeling for the estimation of interconnections between the P cycle and soil properties [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2017, 109 (2):193-207.
- Siqueira T M, Louzada J A S, Pedrollo O C, et al. Soil [21] physical and hydraulic properties in the Donato stream basin, RS, Brazil. Part 1: Spatial variability [J]. Revista Brasileira De Engenharia Agricola E Ambiental, 2019,23(9):669-674.
- $\lceil 22 \rceil$ Patil N G, Singh S K. Pedotransfer functions for estimating soil hydraulic properties: A review [J]. Pedosphere, 2016, 26(4): 417-430.
- Wösten J H M, Lilly A, Nemes A, et al. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils [J].Geoderma, 1999, 90(3/4): 169-185.
- $\lceil 24 \rceil$ Qiao J B, Zhu Y J, Jia X X, et al. Development of pedotransfer functions for soil hydraulic properties in the critical zone on the Loess Plateau, China [J]. Hydrological Processes, 2018, 32(18): 2915-2921.
- $\lceil 25 \rceil$ Santra P, Das B S. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India [J].Geoderma, 2008, 146(3/4): 439-448.
- Hodnett M G, Tomasella J. Marked differences be-[26] tween van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils [J].Geoderma, 2002, 108(3/4):155-180.
- $\lceil 27 \rceil$ 刘彩虹,卞建民,王宇.吉林西部盐碱土壤水力学参数 特征及其影响因素「」了.东北大学学报(自然科学版), 2016,37(2):268-272.