

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.242>



基于 PCA-GWR 的包气带不同土层饱和 导水率的传递函数及其回归克里金估计

湛江^{1,2}, 李志萍^{1,2*}, 赵贵章^{1,2}, 王琳³, 袁巧灵^{1,2}

1. 华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南郑州 450003

2. 水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心, 河南郑州 450003

3. 河南省地质环境监测院, 河南郑州 450003

摘要: 饱和导水率是重要的土壤水力学参数, 对渗流和溶质运移研究起着至关重要的作用. 土壤传递函数可以代替大规模采样和室内外试验间接预测该参数, 但由于土壤的空间变异性以及方法的局限性等原因, 以往的传递函数往往精度有限. 本文以黄河下游沿岸兰考县闫楼乡包气带不同土层为研究对象, 基于 64 个钻孔数据, 将土壤粒径分布 (黏粒、粉粒和砂粒含量)、土壤结构分形维数、干容重、总孔隙度、pH 值、有机质和电导率等 9 个基本理化特性参数作为影响因素, 基于逐步回归、主成分回归和主成分-地理加权回归 (PCA-GWR) 三种方法, 分别对研究区包气带不同土层的饱和导水率进行回归分析, 比较精度后基于 PCA-GWR 对饱和导水率进行地理加权回归克里金插值. 结果显示, 除表层粉土以外, PCA-GWR 法的预测精度有显著优势. 不同土层传递函数和饱和导水率分布的差异性表明, 由于黄河下游地区快速多变的沉积过程、黄河的决口改道以及人类活动等因素, 包气带土层相变剧烈, 土壤饱和导水率在平面上亦具有明显的非平稳特征. 而局部地质作用和人类活动是第二层粉土层回归克里金估计结果欠佳的深层原因.

关键词: 包气带; 土壤饱和导水率; 土壤传递函数; 地理加权回归; 地质统计学; 回归克里金插值; 水文地质; 环境地质.

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2024)03-978-14

收稿日期: 2022-01-28

Pedo-Transfer Function and Regression Kriging Estimation of Saturated Hydraulic Conductivity of Different Soil Layers in Vadose Zone Based on PCA-GWR

Zhan Jiang^{1,2}, Li Zhiping^{1,2*}, Zhao Guizhang^{1,2}, Wang Lin³, Yuan Qiaoling^{1,2}

1. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450003, China

2. Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficient Utilization and Protection Engineering of Henan Province, Zhengzhou 450003, China

3. Geological Environment Monitoring Institute of Henan Province, Zhengzhou 450003, China

Abstract: Saturated hydraulic conductivity is a significant soil hydraulic parameter, which plays an important role in the research of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41972261); 河南省自然资源厅 2019—2020 年度科技项目 (No. 201937913).

作者简介: 湛江 (1992—), 男, 博士研究生, 主要从事水文地质与环境地质学的研究. ORCID: 0000-0001-9565-3669. E-mail: zj20181021@163.com

*** 通讯作者:** 李志萍, E-mail: lizhiping@ncwu.edu.cn.

引用格式: 湛江, 李志萍, 赵贵章, 王琳, 袁巧灵, 2024. 基于 PCA-GWR 的包气带不同土层饱和导水率的传递函数及其回归克里金估计. 地球科学, 49(3): 978—991.

Citation: Zhan Jiang, Li Zhiping, Zhao Guizhang, Wang Lin, Yuan Qiaoling, 2024. Pedo-Transfer Function and Regression Kriging Estimation of Saturated Hydraulic Conductivity of Different Soil Layers in Vadose Zone Based on PCA-GWR. *Earth Science*, 49(3): 978—991.

seepage and solute transport. Pdeo-Transfer Functions (PTFs) can indirectly predict this parameter instead of large-scale sampling and indoor and outdoor tests. However, due to the spatial variability of soils and the limitations of methods, previous predictions of PTFs are not accurate enough. This study takes different soil layers in the vadose zone of Yanlou Township, Lankao County, the lower reaches of the Yellow River as the research object. Based on 64 borehole data, nine basic physicochemical properties such as soil particle size distribution (clay, silt and sand content), soil structure fractal dimension, dry bulk density, total porosity, pH value, organic matter and electrical conductivity are considered as the influencing factors of the PTFs. Based on Stepwise Regression, Principal Component Regression and Principal Component Analysis-Geographically Weighted Regression (PCA-GWR), the saturated hydraulic conductivity of different soil layers is regressed separately. After comparison of precision, Geographically Weighted Regression Kriging is carried out for saturated hydraulic conductivity based on PCA-GWR. The results reveal that the prediction accuracy of PCA-GWR method has significant advantages except for the surface silt. The difference of the distribution of saturated hydraulic conductivity and PTFs in different soil layers shows that, due to the rapid and changeable sedimentation process in the lower reaches of the Yellow River, the breach and diversion of the Yellow River and human activities, the phase change of soil layer in the vadose zone is intense, and the saturated hydraulic conductivity also has obvious non-stationary characteristics in the plane. The local geological process and human activities are the deep reasons for the poor regression Kriging estimation results of the second layer of silt.

Key words: vadose zone; saturated hydraulic conductivity; pedo-transfer functions; geographically weighted regression; geostatistics; regression Kriging; hydrogeology; environmental geology.

0 引言

饱和导水率是重要的土壤水力学参数,对于土壤水分和溶质运移研究有着不可或缺的作用,直接关系到相关水文模型的准确性.但由于土壤的空间变异等原因,在科学研究和工程建设中,往往需要大量的饱和导水率数据.因此,通过土壤粒径分布等理化性质参数建立传递函数(pedo-transfer functions, PTFs),成为大规模间接获取该参数的有效途径.

国外的PTFs相关研究起步较早,比较知名的饱和导水率传递函数模型有Cosby *et al.* (1984)、Saxton *et al.* (1986)、Vereecken *et al.* (1990)、Wösten *et al.* (1999)、Julia *et al.* (2004)等.以上模型基本都建立在多元回归统计的基础上,并在国内有许多应用(孙丽等, 2015;王子龙等, 2016;黄婉霞等, 2020),特别是在我国西北黄土区和干旱风沙区,取得了许多成果(Huang *et al.*, 2010;李祥东等, 2019;杨震等, 2020).但由于PTFs的地域性,有时经典模型的泛化性能不佳,许多地区的PTFs需要重新采集样本建立,其中所采用的方法以多元回归(Li *et al.*, 2007;Liu *et al.*, 2007;姚淑霞等, 2013;邹刚华等, 2013;孙美等, 2014;房丽晶等, 2020)和人工神经网络(李慧霞等, 2010;廖凯华等, 2012;高鹏飞等, 2021;Zheng *et al.*, 2021)为主.

国内有关饱和导水率PTFs的理论创新较少,近几年有赵春雷等(2014)基于状态空间方程

开展的PTFs研究,刘琨和黄冠华(2019)基于集合卡尔曼滤波法对二维土壤饱和导水率进行了估计,王海曼和倪万魁(2022)利用孔隙分布推导了基于分形理论的渗透系数模型.此外,葛勤等(2017)利用化学示踪法对黏土的饱和导水率进行了预测.总体来说,以上研究存在以下几个问题:首先,受限于研究成本和采样技术等问题,研究对象大多为表层土壤,仅有乔江波(2019)建立了黄土高原巨厚包气带土壤水力学参数的PTFs,其他地区包气带深部土壤的饱和导水率缺乏研究.其次,无论多元回归还是人工神经网络等机器学习方法,均未考虑土壤饱和导水率作为一种地质信息在空间分布上的作用,即地理因素对其产生的影响.第三,绝大部分传递函数的影响因素较少,基本只考虑了土壤粒径分布、容重和有机质含量等因素,对影响土壤饱和导水率规律的机理缺乏深刻认识(刘天奇等, 2021).

本文选取包气带不同岩性土层作为研究对象,将土壤粒径分布、土壤结构分形维数、干容重、总孔隙度、pH值、有机质和电导率等9种土壤理化性质参数作为影响因素,采用PCA-GWR方法建立了研究区包气带不同土层的土壤饱和导水率的PTFs,并基于PCA-GWR结果对其进行了回归克里金插值估计.本研究可为黄河下游沿岸土壤水和溶质运移研究提供数据支撑,也为建立土壤水力学参数的PTFs提供新思路.

1 材料与方 法

1.1 研究区概 况

研究区位于河南省兰考县闫楼乡(图 1), 属黄河下游冲积平原,距黄河南岸仅有 21 km, 原为黄河故道。

由于黄河下游频繁发生洪涝灾害,泥沙 溢出河道,导致沿岸第四系轮回沉积,在垂 向上逐渐形成了粉土、粉质黏土和粉砂土 3 种岩性截然不同的土层(图 2)。

1.2 采样与测试

1.2.1 采样 笔者经前期调查踏勘,确定了研究 区范围(114°57'23"E~115°00'02"E, 34°54'27"N~ 34°52'31"N),研究区呈正方形,长宽约 4 km,面 积约为 16 km²。采用网格法取样,网格单元大小 为 500 m×500 m。使用 RTK 技术确定采样点坐 标,共设置采样点钻孔 64 个。为避开建筑物和 街道,采样点位置稍有偏离网格中心(图 3)。

研究区土壤从地表到地下共分为 3 种(粉土层、

粉质黏土层、粉砂层),局部粉土层侵蚀,只出现粉 质黏土层和粉砂层。考虑到地表土壤受人类土地利 用(农业、村庄和工程建设等)影响较大,因此本文 对表层土壤(分别考虑粉土和粉质黏土)单独进行 了细致研究。除去因粉土层的侵蚀导致第二层粉 土层样品不足 64 个以外,其余土层均取 64 个样品 (其中表层包含 45 个粉土样品和 19 个粉质黏土样 品),共计取得 233 个样品,每个样品取若干份以 供不同试验。表 1 显示了研究区土层和取样情况。

图 3 中显示了 4 个钻孔(LK0104、LK0108、 LK0801 和 LK0808)的剖面柱状图,表层与第 二层均以地表以下 30 cm 为界。可以看出, 位于研究区西北部洼地的 LK0104 号钻孔, 由于粉土层的风蚀剥离,只有 3 层。

1.2.2 测试 尽管有研究表明,影响土壤饱和和导水 率的影响因素可能多达 31 种(Rawls *et al.*, 1991), 通常自变量(影响因素)越多,PTFs 精度也会越高。 本文在前人研究的基础上,兼顾到影响因素的维度 和可操作性,考虑了土壤结构组成、土壤基本物理

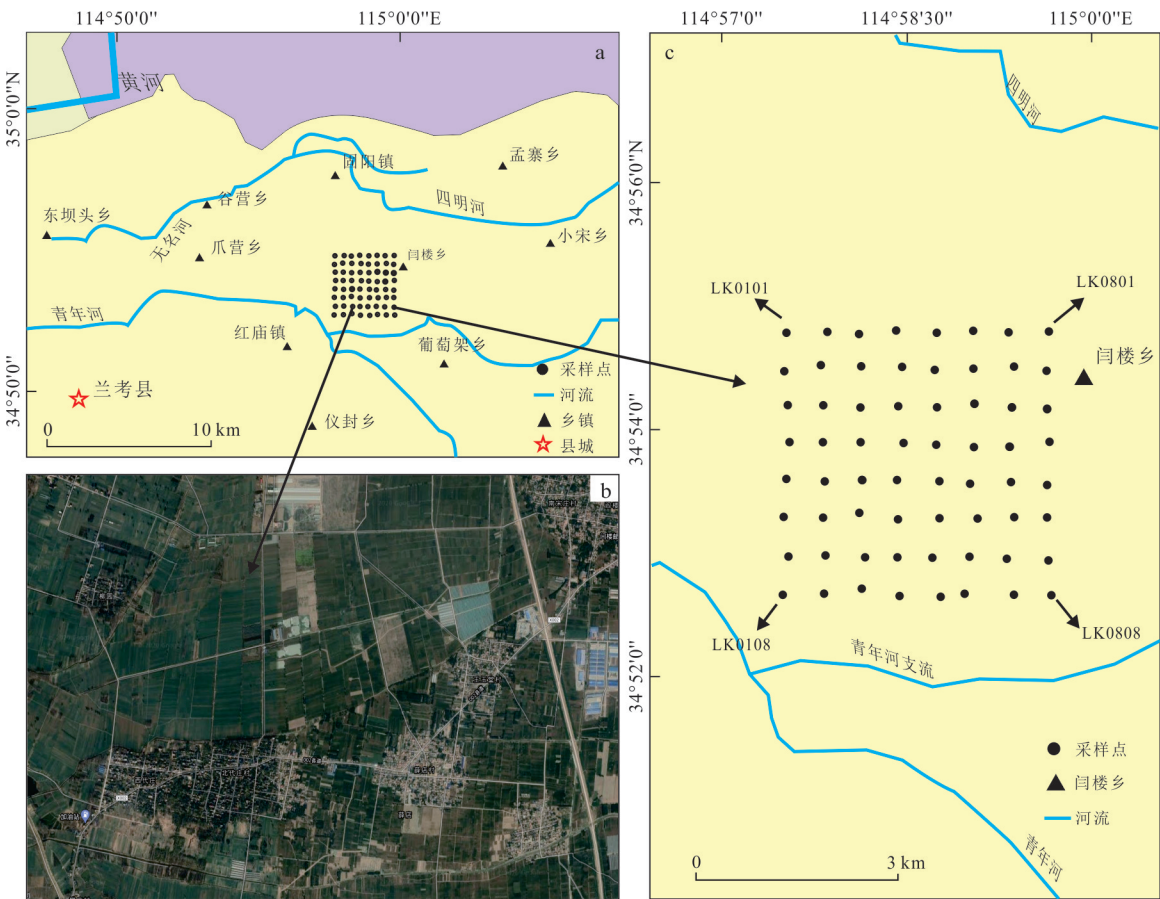


图 1 研究区示意图

Fig.1 Map of study area

a. 地理位置; b. 卫星图; c. 采样点分布

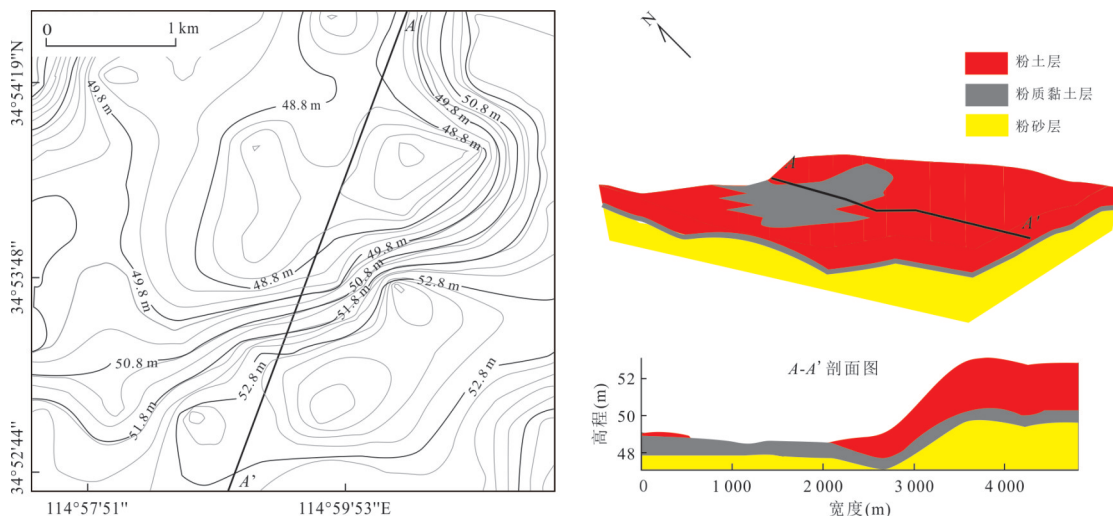


图2 研究区包气带底板等值线图、三维示意图与剖面图

Fig.2 Contour map, three-dimensional diagram and profile of vadose zone floor in the study area

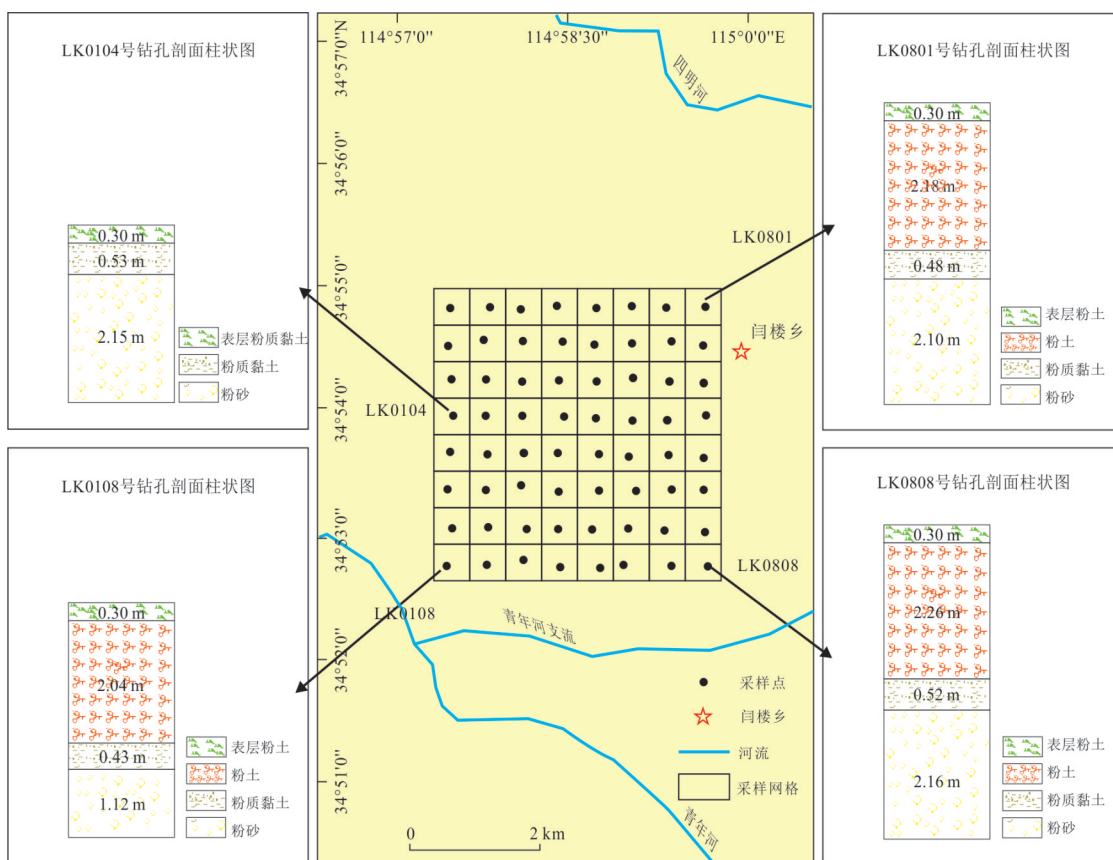


图3 研究区采样点分布和代表钻孔剖面柱状图

Fig.3 Histogram of sampling point distribution and representative borehole profile in the study area

特性和化学特性3个方面,选择了黏粒(clay)、粉粒(silt)和砂粒(sand)的体积含量、土壤结构分形维数(D)、干容重(BD)、总孔隙度(n)、pH值、有机质含量(OM)和电导率(EC),共计9个因素作为建立PTFs的自变量.其中,分形维数

是表征土壤粒径分布的参数,分形维数越大,表明土壤粒径越不均匀,它可以帮助精确刻画土壤粒径分布特征.本文采用土壤体积分布分形维数的计算公式(王国梁等,2005).表2显示了这些土壤理化性质参数的测试方法.

表 1 土层岩性、厚度和取样情况
Table 1 Lithology, thickness and sampling of soil layers

土层	岩性	样品数	土层平均厚度(m)	取样深度(m)	平均取样深度(m)
表层	粉土	45	0.30	0.15	0.15
表层	粉质黏土	19	0.30	0.15	0.15
第二层	粉土	41	2.25	1.27~1.60	1.42
第三层	粉质黏土	64	0.59	0.51~2.90	1.84
第四层	粉砂	64	1.79	1.24~4.04	2.78

1.3 方法

1.3.1 逐步回归、主成分回归与地理加权回归 在进行主成分-地理加权回归 (PCA-GWR) 分析之前, 本文首先采用多元逐步回归和主成分回归两种方法尝试建立 PTFs, 以用于和 PCA-GWR 的结果进行比较. 地理加权回归 (geographically weighted regression, 简称 GWR) 是一种考虑变量在空间分布规律的回归方法, GWR 通常以普通最小二乘回归 (OLS) 为基础, 将每个数据的空间相对点位的空间关系代入到方程中, 其回归形式如下 (Fotheringham *et al.*, 1996):

$$y_i = \beta(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^N \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i, \quad (1)$$

其中, (u_i, v_i) 为采样点坐标; $\beta_0(u_i, v_i)$ 为截距项; $\beta_k(u_i, v_i)$ 为第 k 个变量在 i 位置处的 GWR 回归系数; ε_i 为位置 i 处的随机误差项.

逐步回归和主成分回归的理论与方法详见孙丽等 (2015), 二者均在 SPSS18.0 软件中完成计算, GWR 的计算在 ArcGIS10.2 中完成.

1.3.2 地质统计学与回归克里金插值 在 GWR 分析之后, 可以在回归残差分析的基础上, 对残差与预测值的克里金插值相叠加从而得到变量的分布, 这种方法即为地理加权回归克里金法 (瞿明凯等, 2014).

地质统计学是研究区域化变量空间分布结构特征的有效手段, 也是克里金插值的基础 (张洁等, 2023). 它的基本工具为 (半) 变异函数, 当区域化变量满足 (准) 二阶平稳条件或 (准) 内蕴假设时, 可由下式估计:

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

其中, $\gamma(h)$ 为变异函数; $Z(x)$ 为采样点 x 处区域化变量的值; $N(h)$ 为间隔为 h 的点对数目; h 为信息点之间的间隔, 称为滞后距.

本文有关变异函数模型的拟合在 GS⁺9.0 软件中完成, 回归克里金插值的计算和制图在 ArcGIS10.2 中完成. 克里金插值的方法有很多, 本研究选择经验贝叶斯克里金插值 (empirical Bayesian Kriging, 简称 EBK), EBK 法作为一种改进的地质统计学插值方法, 用构造子集和模拟来自动计算相关参数, 而不是像其他克里金方法需要手动调整参数, 对于每个预测位置, 都使用新的变异函数分布计算, 这降低了变异函数选择的不稳定性, 重要的是这避免了采用 GS⁺9.0 等其他软件做地质统计分析后, 需要在 ArcGIS 中进行重新调参的问题.

1.4 精度评价标准

本文根据需要, 选择均方根误差 (RMSE)、决定系数 (R^2) 和相关系数 (r) 评价模型精度.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_m - y_p)^2}, \quad (3)$$

$$R^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_p - \bar{y}_m)^2}{(y_m - \bar{y}_m)^2}, \quad (4)$$

$$r = \sqrt{\frac{cov(y_m - y_p)^2}{var(y_m)var(y_p)}}, \quad (5)$$

以上式中, y_m 为模型实测值; y_p 为模型预测值; $\bar{y}_m$ 为

表 2 测试项目与方法
Table 2 Test items and methods

测定项目	测试方法	试验设备或参考标准
土壤饱和导水率(cm/s)	变水头渗透仪法	南京宁曦土壤变水头渗透仪 BST-1 型
土壤结构组成 (%)	激光粒度仪法	北京渠道科技 QT-2012 型
土壤干容重 (%)	烘干法	《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)
土壤总孔隙度 (%)	烘干法	《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)
土壤有机质(g/kg)	重铬酸钾滴定法	《农业行业标准》(NY/T 1121.6-2006)
土壤 pH 值 (-)	pH 酸度计	《农业行业标准》(NY/T 1121.6-2006)
土壤电导率(μm/s)	电导率仪法	《农业行业标准》(NY/T 1121.6-2006)

实测值均值. $RMSE$ 越小表示绝对误差越小; R^2 越接近于 1, 表示整体越接近于实测值; r 反映了预测值与实测值在变化趋势上的相似性, r 越接近 1, 说明预测值与实测值在变化趋势上越相似.

2 结果与讨论

2.1 土壤饱和导水率和基本理化特性

表 3 显示了不同土层饱和导水率(K_s)和基本理化特性的经典统计学特征.经典统计学反映出以下 3 个基本结论:(1)总体上,5 种土样的饱和导水率的变异性较强,从表层到深层变异程度逐渐减弱.(2)表层土壤的各项理化特性变异程度较高,特别是土壤结构组成和土壤化学特性.(3)干容重和总孔隙度的变异系数低,表明土壤物理特性相对稳定.

2.2 回归分析

2.2.1 逐步回归 根据饱和导水率与 9 个影响因素的关系,以决定系数最大为原则,分别建立最优单因素方程,再由单因素方程进行逐步回归并使用偏最小二乘回归法进行 F 检验.以显著

性检验量小于 0.1 进入回归,小于 0.15 移除回归方程.每当有新的因素进入回归方程,需要对已经进入回归方程的其他因素进行 t 检验,以显著性检验量小于 0.1 保留回归方程,否则剔除.经过逐步回归后的方程形式及其精度评价见表 4.

由表 4 可知,不同土层土壤回归方程的决定系数为 0.511~0.880,除表层和第三层的粉质黏土以外,其余土层回归方程的决定系数均低于 0.7,表明整体上逐步回归的精度有待提高;从方程形式上看,不同土层饱和导水率的主导因素不同.譬如,表层粉质黏土的土壤饱和导水率主要由 2 个变量主导,即有机质和电导率,表明表层的粉质黏土受到耕作等人类活动的影响.而第四层粉砂的土壤饱和导水率仅由分形维数和干容重主导,表明包气带深部土壤化学特性较稳定,饱和导水率主要受到土壤基本物理特性的影响.

2.2.2 主成分回归 逐步回归中严苛和反复的显著性检验会导致一些影响因素被排除在回归方程外,有些因素之间存在极强的相关性,虽然其对方程的回归影响不显著,但会使得 PTFs 丧失部分信

表 3 不同土层土壤饱和导水率和理化特性的经典统计学特征
Table 3 Classical statistical characteristics of saturated hydraulic conductivity and physicochemical properties of soils in different topsoil layers

指标		饱和导水率 K_s (m/d)	黏粒 (%)	粉粒 (%)	砂粒 (%)	分形 维数	干容重 (kN/m^3)	孔隙度 (%)	pH 值	有机质 (g/kg)	电导率 ($\mu s/m$)
表层 (粉土)	最小值	0.016 2	0.00	16.34	0.03	1.436	12.06	34.47	7.84	1.09	19.37
	最大值	1.930 8	4.58	98.65	83.66	2.246	16.44	50.12	9.51	31.20	1 141.20
	均值	0.458 9	0.59	76.40	22.99	1.923	13.85	42.02	8.65	8.96	432.06
	变异系数	1.024 4	2.110 7	0.283 3	0.961 1	0.109 2	0.067 9	0.093 9	0.041 8	0.620 0	0.615 1
表层 (粉质黏土)	最小值	0.001 1	0.00	1.33	0.00	1.229	12.80	38.16	8.01	2.16	102.25
	最大值	0.587 2	91.28	93.22	0.60	2.470	16.06	53.24	9.20	27.80	824.85
	均值	0.129 5	39.80	54.98	0.0337	2.328	14.57	45.53	8.48	14.14	495.41
	变异系数	1.273 0	0.653 3	0.492 8	4.080 4	0.116 4	0.062 1	0.744 8	0.035 1	0.483 9	0.417 2
第二层 (粉土)	最小值	0.007 2	0.00	18.80	0.00	1.500	12.01	39.01	8.10	1.02	8.67
	最大值	1.575 1	27.03	99.81	81.20	2.258	15.55	67.00	9.70	6.86	242.03
	均值	0.432 5	1.17	69.85	28.99	1.802	13.71	46.39	8.74	3.05	137.17
	变异系数	0.915 3	3.820 5	0.359 3	0.896 2	0.112	0.064 2	0.106 7	0.036 6	0.498 4	0.507 7
第三层 (粉质黏土)	最小值	0.005 8	0.00	17.54	0.00	1.513	12.06	36.09	7.90	1.21	32.76
	最大值	0.930 8	82.46	99.95	79.61	2.458	15.84	64.58	9.70	23.30	179.25
	均值	0.210 5	19.71	74.14	6.83	2.210	13.69	48.18	8.58	6.51	104.74
	变异系数	0.887 8	1.081 2	0.292 0	2.472 9	0.117	0.062 0	0.104 2	0.038 5	0.672 8	0.415 8
第四层 (粉砂)	最小值	0.123 7	0.08	0.05	21.51	1.046	13.26	32.30	8.40	0.57	78.77
	最大值	1.989 5	3.44	77.32	99.95	1.608	15.36	50.06	9.40	13.50	477.41
	均值	0.952 8	1.40	16.01	16.16	0.145	0.54	2.59	0.24	1.98	117.92
	变异系数	0.473 0	0.897 4	1.493 5	0.180 9	0.105	0.037 1	0.058 7	0.027 0	1.010 2	0.462 1

注:变异系数和分形维数均为无量纲.

表 4 逐步回归方程及其精度评价

Table 4 Stepwise regression equation and accuracy evaluation

土层	逐步回归方程	RMSE	R ²
表层 (粉土)	$K_s=6.759-0.162\text{silt}+2.06\times 10^{-3}\text{silt}^2-1.199\times 10^{-5}\text{silt}^3-0.371\text{pH}+3.664\times 10^{-4}EC-4.673EC^2+9.760\times 10^{-10}EC^3$	0.320 7	0.524
表层 (粉质黏土)	$K_s=-0.586+3.186/OM+3.210\times 10^{-3}EC-6.182\times 10^{-6}EC+3.193\times 10^{-9}EC^3$	0.115 9	0.880
第二层 (粉土)	$K_s=1.12-6.93\times 10^{-3}\text{sand}+5.48\times 10^{-4}\text{sand}^2-5.01\times 10^{-6}\text{sand}^3-3.89\times 10^{-1}OM+5.70\times 10^{-2}OM^2-2.39\times 10^{-3}OM^3$	0.278 5	0.604
第三层 (粉质黏土)	$K_s=3.40+9.75\times 10^{-4}\text{sand}+4.15\times 10^{-4}\text{sand}^2-4.06\times 10^{-6}\text{sand}^3+1.25\times 10^{-3}\text{e}^{(5.594+29.155/\text{silt})}+9.52\times 10^{-1}\text{pH}+5.93\times 10^{-2}\text{pH}^2$	0.098 8	0.721
第四层 (粉砂)	$K_s=1.29+6.67\text{e}^{(-1.489D)}-2.28\times 10^{-1}BD+1.60\times 10^{-2}BD^2$	0.312 9	0.511

注: clay(%), silt(%), sand(%), D(-), BD(kN/m³), n(%), pH 值(-), OM(g/kg), EC(μs/m), K_s(m/d).

表 5 不同土层主成分表达式

Table 5 Principal component expression of different soil layers

土层	主成分向量表达式
表层 (粉土)	$F_1=0.260x_1+0.413x_2-0.420x_3+0.453x_4+0.268x_5-0.220x_6-0.286x_7+0.362x_8-0.217x_9$ $F_2=0.006x_1+0.324x_2-0.317x_3+0.162x_4-0.550x_5+0.600x_6-0.049x_7-0.020x_8+0.321x_9$ $F_3=0.538x_1+0.117x_2-0.147x_3+0.138x_4+0.136x_5-0.025x_6+0.652x_7-0.460x_8+0.009x_9$ $F_4=0.319x_1-0.126x_2+0.104x_3+0.004x_4+0.110x_5-0.238x_6-0.086x_7+0.249x_8+0.856x_9$ $F_5=0.668x_1-0.365x_2+0.318x_3+0.098x_4-0.257x_5+0.237x_6-0.294x_7+0.105x_8-0.302x_9$
表层 (粉质黏土)	$F_1=0.090x_1+0.355x_2-0.533x_3+0.503x_4+0.046x_5+0.056x_6-0.041x_7+0.345x_8+0.102x_9$ $F_2=0.620x_1-0.462x_2-0.152x_3+0.234x_4+0.476x_5-0.125x_6+0.171x_7-0.020x_8-0.229x_9$ $F_3=0.294x_1-0.177x_2-0.124x_3+0.189x_4-0.464x_5+0.676x_6+0.147x_7-0.290x_8+0.230x_9$ $F_4=0.157x_1-0.254x_2+0.127x_3-0.089x_4-0.016x_5-0.231x_6+0.017x_7+0.360x_8+0.838x_9$
第二层 (粉土)	$F_1=0.190x_1+0.490x_2-0.506x_3+0.479x_4-0.062x_5+0.080x_6-0.234x_7+0.415x_8+0.023x_9$ $F_2=0.358x_1-0.031x_2-0.032x_3+0.216x_4+0.598x_5-0.588x_6+0.280x_7-0.044x_8-0.196x_9$ $F_3=0.561x_1-0.189x_2+0.087x_3+0.172x_4-0.155x_5+0.165x_6+0.290x_7-0.056x_8+0.689x_9$ $F_4=-0.231x_1-0.187x_2+0.219x_3+0.021x_4+0.276x_5-0.319x_6-0.568x_7+0.324x_8+0.508x_9$ $F_5=-0.568x_1+0.281x_2-0.175x_3-0.052x_4+0.228x_5+0.005x_6+0.592x_7+0.122x_8+0.385x_9$
第三层 (粉质黏土)	$F_1=0.517x_1-0.121x_2-0.492x_3+0.591x_4-0.023x_5+0.255x_6-0.030x_7+0.141x_8+0.203x_9$ $F_2=-0.256x_1+0.413x_2-0.212x_3+0.040x_4-0.322x_5+0.434x_6+0.379x_7-0.520x_8+0.100x_9$ $F_3=-0.261x_1+0.556x_2-0.387x_3+0.204x_4+0.467x_5-0.415x_6+0.097x_7+0.166x_8-0.063x_9$ $F_4=0.244x_1-0.330x_2+0.119x_3+0.036x_4+0.457x_5-0.151x_6+0.676x_7-0.353x_8-0.048x_9$ $F_5=-0.103x_1+0.003x_2+0.125x_3-0.094x_4+0.231x_5-0.032x_6-0.114x_7-0.076x_8+0.944x_9$
第四层 (粉砂)	$F_1=0.335x_1+0.495x_2-0.499x_3+0.464x_4-0.264x_5-0.163x_6-0.045x_7+0.271x_8-0.082x_9$ $F_2=0.148x_1+0.167x_2-0.169x_3-0.082x_4-0.243x_5+0.472x_6+0.628x_7-0.444x_8+0.204x_9$ $F_3=0.058x_1+0.297x_2-0.296x_3-0.148x_4+0.630x_5-0.227x_6-0.153x_7-0.311x_8+0.480x_9$ $F_4=0.111x_1-0.237x_2+0.232x_3+0.267x_4-0.104x_5-0.052x_6+0.162x_7+0.398x_8+0.780x_9$ $F_5=-0.647x_1+0.257x_2-0.236x_3-0.073x_4-0.019x_5+0.520x_6-0.209x_7+0.332x_8+0.172x_9$ $F_6=0.555x_1-0.107x_2+0.091x_3+0.063x_4+0.090x_5+0.605x_6-0.540x_7-0.057x_8+0.034x_9$

注:表中 $x_1, x_2, \cdots, x_9$ 为标准化后的自变量值,依次代表黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量、分形维数、容重、总孔隙度、pH 值、有机质和电导率.

息,一定程度上降低 PTFs 精度,并且由非线性逐步回归建立的回归方程形式比较复杂.由于 GWR 要求自变量不存在多重共线性,而主成分分析(principal component analysis,简称 PCA)通过因子之间的线性组合,降低了多重共线性的同时,又尽力保留了原有影响因素的信息,因此本文选择 PCA 方法进行降维并回归.本文选择总方差解释比在 85% 以上的向量组成主成分向量(表 5 所示).

表 6 主成分回归方程及其精度评价

Table 6 Principal component regression equation and its accuracy evaluation

土层	主成分回归方程	RMSE	R ²
表层 (粉土)	$K_s = -7.40 \times 10^{-2} F_1 - 8.04 \times 10^{-3} F_2 - 1.30 \times 10^{-1} F_3 + 1.79 \times 10^{-1} F_4 + 6.7 \times 10^{-2} F_5 + 0.459$	0.385 0	0.319 0
表层 (粉质黏土)	$K_s = -1.67 \times 10^{-1} F_1 - 6.40 \times 10^{-2} F_2 + 1.01 \times 10^{-2} F_3 - 2.12 \times 10^{-2} F_4 + 2.02 \times 10^{-2}$	0.145 2	0.812 3
第二层 (粉土)	$K_s = -1.59 \times 10^{-1} F_1 - 4.12 \times 10^{-3} F_2 - 6.66 \times 10^{-3} F_3 + 1.99 \times 10^{-2} F_4 - 3.41 \times 10^{-2} F_5 + 4.33 \times 10^{-1}$	0.268 2	0.541 2
第三层 (粉质黏土)	$K_s = -8.09 \times 10^{-2} F_1 - 1.62 \times 10^{-2} F_2 - 5.56 \times 10^{-2} F_3 - 3.66 \times 10^{-3} F_4 + 2.29 \times 10^{-2} F_5 + 2.10 \times 10^{-1}$	0.111 2	0.645 8
第四层 (粉砂)	$K_s = -1.60 \times 10^{-1} F_1 + 1.07 \times 10^{-2} F_2 + 5.23 \times 10^{-2} F_3 - 7.28 \times 10^{-2} F_4 - 1.15 \times 10^{-2} F_5 + 5.96 \times 10^{-2} F_6 + 9.53 \times 10^{-1}$	0.336 6	0.433 2

注:K_s(m/d).

根据主成分向量表达式并基于最小二乘法,对饱和导水率进行多元线性回归,回归结果如表 6 所示.

由表 4 和表 6 可以看出,逐步回归的回归精度整体上优于主成分回归,这说明主成分回归虽然竭力保留了原始数据信息,但基于非线性的多元逐步回归的精度明显优于线性回归法.三种回归方法的对比分析将在下一节中进行详细解释.

2.2.3 主成分-地理加权回归 在 ArcGIS10.2 中,选择空间统计工具中的“空间关系建模”模块中的地理加权回归选项,以表 5 的主成分表达式作为自变量进行 GWR 分析.在该模块中,带宽的选择会影响空间权重分配,本研究选择交叉验证作为带宽选择方法.经 PCA-GWR 分析后,其预测结果如图 4 所示.由图 4 可以看出,除表层粉土以外,其余土层土壤饱和导水率的预测值和实测值基本吻合.

统计 3 种回归方法的精度以进行对比分析(表 7).由表 7 可以看出,除去表层粉土以外,其余土层土壤的 PCA-GWR 法精度均优于逐步回归和主成分回归,其中第二层的 R² 值高于 0.9,精度提高较为显著,表明其预测较为准确.从回归方法上看,主成分回归法的估计效果不如逐步回归,这说明主成分回归虽然竭力保留了原始数据信息,但逐步回归的非线性拟合还是优于主成分回归下的线性拟合.而 PCA-GWR 法的优势在于,在普通线性回归的基础上充分考虑了空间相对位置对回归方程造成的影响,即多考虑了地理因素,因而回归精度有了显著提高.

从机理上分析,表层粉土的 3 种回归结果并不好,这是由于表层土壤易受到农业生产和工程建设等人类活动的影响,导致土壤特性受到随机因素影

响的比重增大,土壤理化特性在空间上的自相关程度减弱,甚至完全由随机因素主导,GWR 无法确定土壤特性在空间关系上的规律,因而表层土壤的 PCA-GWR 也没有提高预测精度.但表层粉质黏土的回归结果较好,这说明表层粉质黏土的物理化学性质在一定空间范围内呈现聚集效应,在物理特性相似的情况下,可以推断,表层粉质黏土饱和导水率与有机质含量等化学特性联系密切.从沉积环境和沉积过程的角度来看,造成不同土层 PTFs 精度不同的原因是河道变迁以及微地貌的复杂性.由于研究区地处黄河故道,在河道摆动的作用下,古河床和浅层土壤特性在某一方向上可能产生规律性的富集,从而影响饱和导水率分布的非平稳性.研究区虽属广袤的黄河冲积平原,但该地区具有完全不同的微地貌和沉积物结构.包气带土层虽多为河道相类沉积,但兼有湖沼和泛滥洼地下的湖积层.本研究中第三层粉质黏土层即具有明显的湖积相特征,其土质发黑发臭,有机质含量高,理化特性不同于其他土层.总而言之,由于多层次的洪积、冲积、河流改道、决口的组合和叠加,加上城镇密集,历史上水利、交通建设等人为作用(马玉凤等,2015)频繁,黄河下游沿岸的包气带土壤垂向分异明显,其土壤饱和导水率受到土壤结构、理化特性以及空间非平稳特征的综合作用,建立精度高、泛化性强的 PTFs 并不容易.

不同于全局回归,PCA-GWR 的系数随空间位置变化,因此需绘制系数分布图加以确定.但在进行克里金插值之前,需进行地质统计分析以确定是否适宜进行克里金插值.经验证,本文所有土层 PCA-GWR 回归系数的变异函数拟合结果良好,其

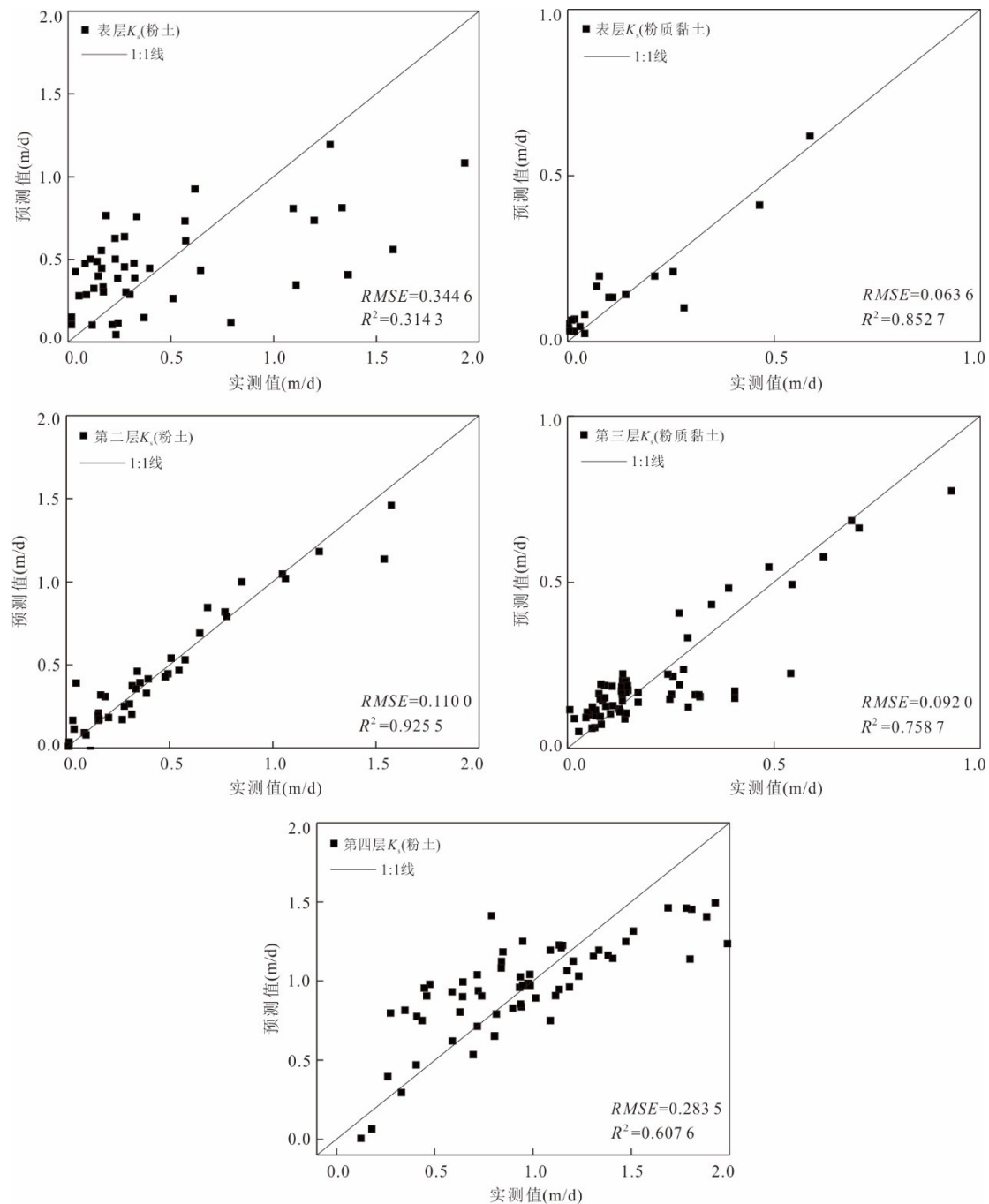


图4 PCA-GWR的预测值与实测值的关系
Fig.4 Relationship between predicted value and measured value of PCA-GWR

决定系数 R^2 均在0.9以上,适宜进行克里金插值.限于篇幅,本文不再赘述各个主成分的系数分布.

2.3 基于主成分-地理加权回归克里金的插值

许多研究 (Kumar *et al.*, 2012; 杨顺华等, 2015; 罗耀文等, 2020) 表明, 地理加权回归克里金插值要比全局回归克里金在局部刻画上更为精细, 预测精度也有优势, 因而在制图领域具有广泛应用前景. 因此本研究基于

2.2.3 节中的 PCA-GWR 结果进行插值预测.

2.3.1 回归方程残差的地质统计分析 进行残差地质统计分析之前, 需检验其是否符合正态分布, 经单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验后, 所有检验量大于 0.05, 表明 PCA-GWR 方法的残差均符合正态分布, 可以进行地质统计分析. 将不同土层饱和导水率的 PCA-GWR 方程的残差导入 GS⁺9.0 软件中, 通常以采样点最小间隔距离, 即 361.31 m 作为

表 7 三种回归方法的精度比较

Table 7 Accuracy comparison of three regression methods

	指标	逐步回归	主成分回归	PCA-GWR
表层 (粉土)	RMSE	0.320 7	0.385 0	0.384 9
	R^2	0.523 9	0.313 9	0.314 3
表层 (粉质黏土)	RMSE	0.113 2	0.145 2	0.063 6
	R^2	0.752 9	0.583 8	0.852 7
第二层 (粉土)	RMSE	0.278 5	0.268 2	0.110 0
	R^2	0.604 3	0.541 2	0.925 5
第三层 (粉质黏土)	RMSE	0.098 8	0.111 2	0.092 0
	R^2	0.720 6	0.645 8	0.758 7
第四层 (粉砂)	RMSE	0.312 9	0.336 6	0.283 5
	R^2	0.510 5	0.433 2	0.607 6

滞后距间隔,以采样点最大间隔距离的 80%,即 3 120.86 m 作为有效滞后距,滞后等级采用均匀分布模式.地质统计分析(表 8)显示,PCA-GWR 法的残差在不同土层的最优变异函数模型各异.其

表 8 不同土层 K_s 的 PCA-GWR 方程的残差的最优变异函数模型

Table 8 Optimal variogram model for PCA-GWR equation of K_s in different soil layers

土层	模型	块金值	基台值	块金系数	变程 (m)	R^2	RMSE
表层	指数	0.001	0.102	0.212	166	0.001	0.009
第二层	球状	0.009	18.000	0.999	678	0.001	1.538
第三层	球状	0.009	9.840	0.001	915	0.659	0.131
第四层	高斯	0.086	45.070	0.002	568	0.444	0.781

中表层和第二层的变异函数拟合结果较差,其 R^2 均不足 0.1,可以认为其残差不满足二阶平稳. **2.3.2 插值结果与精度评价** 本研究对不同土层的 PCA-GWR 回归残差进行 EBK 插值,并与相应趋势项进行栅格叠加计算,以得到地理加权回归经验贝叶斯克里金(简称为 GWR-EBK)插值结果.经过分析,GWR-EBK 法的插值结果如图 5 所示.

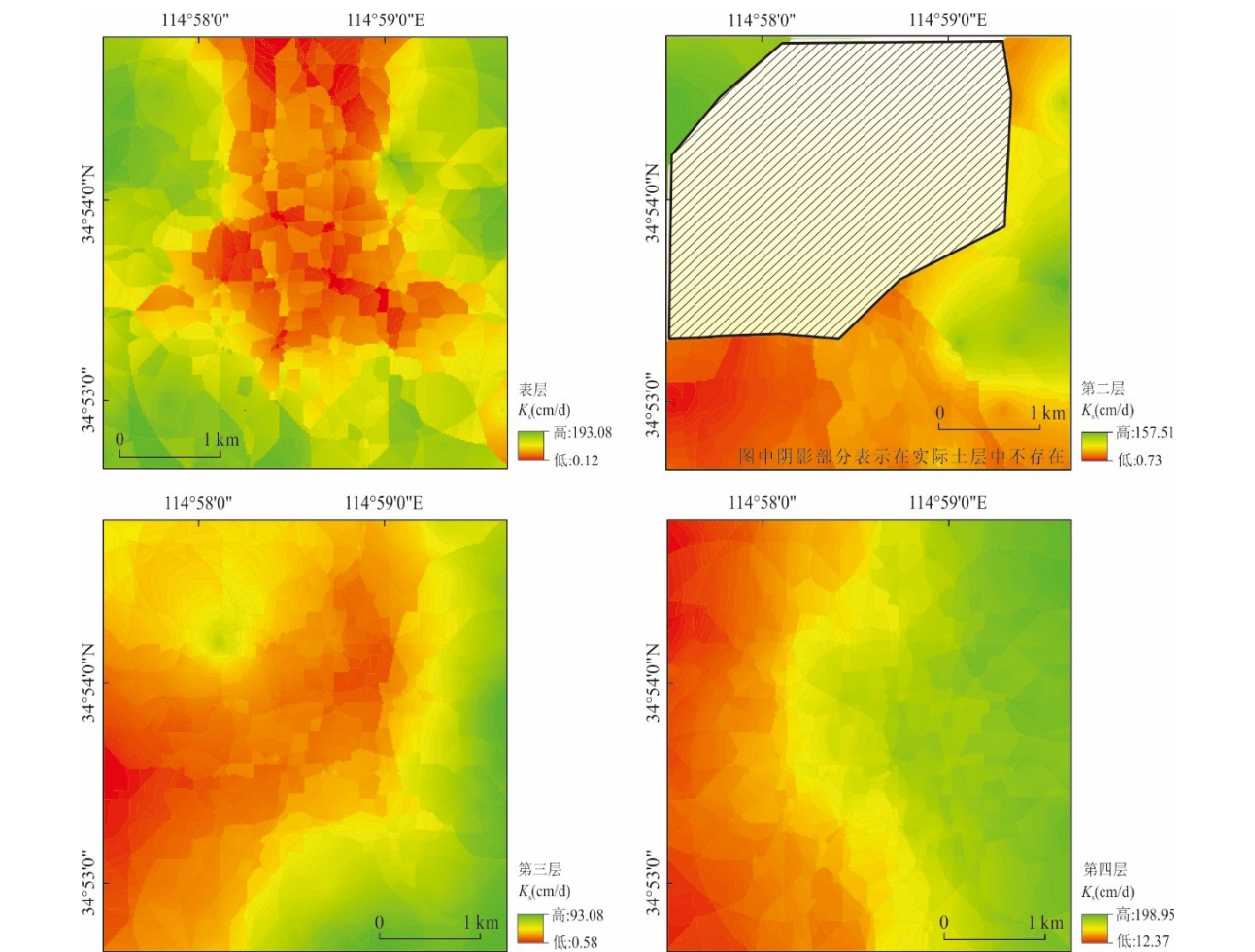


图 5 不同土层饱和和导水率的 GWR-EBK 插值

Fig.5 GWR-EBK interpolation of saturated hydraulic conductivity in different soil layers

(1)表层的饱和导水率在中北部较低,在南部和东部较低.从土壤质地的角度来看,由于粉质黏土层出露地表,土壤质地细腻;而南部和东部高地为村庄,该区域的岩性以粉土为主,相对而言饱和导水率较高;并且,西北部土地为农田,人类的耕种也会改变表层土壤理化特性和孔隙结构,继而导致饱和导水率的进一步降低.(2)第二层土壤饱和导水率在西南部较低,西北部和东部较高,呈两侧发散.由于该层是上覆土层,与黄河故道河床沉积物联系密切,相对来说,饱和导水率反映出的渗透能力变化,应与河道形态和摆动有关.(3)第三层是以粉质黏土层为主体的湖积层,该层虽薄但分布广泛,其沉积物的有机质含量普遍较高,理化特性相对稳定,该层饱和导水率的分布差异是土壤结构、微地貌以及土壤理化特性综合作用的结果.(4)第四层土壤的饱和导水率自西向东逐渐增大.由于该土层以粉砂为主体,沉积物颗粒大小相对稳定,引起渗透性变化的主要原因应与化学特性和局部流速差异有关.

表 9 显示了不同土层饱和导水率的交叉验证结果,除第二层以外,其余相关系数 r 在 0.373 1~0.697 1 之间,表明预测结果较好(Kumar *et al.*, 2012; 杨顺华等, 2015). 第二层相关系数 r 不足 0.2,表明第二层插值结果不够准确.从数学角度分析,这与其相应的残差变异函数模型拟合较差有关,表明单纯依靠空间位置预测的内插估计在预测精度上有仍有较大欠缺,克里金算法造成的平滑效应不太适合变异剧烈的饱和导水率.从沉积历史来看,地表土层本应为粉土,但是研究区西北部的粉质黏土层出露地表,将该土层割裂.伴随长时间的人类活动以及粉质黏土层的侵蚀从而导致该土层西北部和南部的饱和导水率相差悬殊,形成了局部的剧烈变异.除了残差的非平滑性,该土层中预测值的克里金估计误差也是导致回归克里金估计欠佳的重要原因.

表 9 GWR-EBK 法的交叉验证

Table 9 Cross validation of GWR-EBK method		
土层	RMSE	r
表层	0.320 1	0.697 1
第二层	0.391 8	0.183 0
第三层	0.173 8	0.373 1
第四层	0.385 9	0.506 1

3 结论

本文通过比较 3 种回归方法的精度,最终构建了基于 PCA-GWR 法的不同土层饱和导水率的 PTFs,并建立了基于 GWR-EBK 的土壤饱和导水率分布图,主要得到以下结论:

(1)根据 PCA-GWR 建立起的回归方程表明,除表层粉土以外,其余 4 种土壤的预测精度相比于逐步回归和主成分回归均有显著提高.这表明饱和导水率不仅受到土壤结构和土壤理化性质的影响,还受到这些土壤特性在空间分布上的非平稳性作用,因此在建立饱和导水率的 PTFs 时,应充分考虑其影响因素的空间变异性.

(2)由于黄河下游沿岸地区复杂多变的沉积过程、黄河的摆动以及长期人类活动的影响,不同土层饱和导水率的分布、主导因素以及所建立的 PTFs 精度均有较大差异.

(3)除去第二层粉土以外,利用 GWR-EBK 法可以得到预测较为准确的饱和导水率的分布图.由于粉质黏土层的割裂侵蚀以及人类活动因素,造成了该土层饱和导水率的局部变异,进而表现出了回归克里金法的平滑效应.

致谢:感谢匿名审稿专家提出的有益建议!

References

Cosby, B. J., Hornberger, G. M., Clapp, R. B., et al., 1984. A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils. *Water Resources Research*, 20(6): 682–690. <https://doi.org/10.1029/WR020i006p00682>

Fang, L. J., Gao, R. Z., Liu, T. X., et al., 2020. Construction and Evaluation of Pedo-Transfer Functions in the Balager River Basin. *Arid Zone Research*, 37(5): 1156–1165 (in Chinese with English abstract).

Fotheringham, A. S., Charlton, M., Brunson, C., 1996. The Geography of Parameter Space: An Investigation of Spatial Non-Stationarity. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10(5): 605–627. <https://doi.org/10.1080/02693799608902100>

Gao, P. F., Ran, Z. L., Han, Z., et al., 2021. Hydraulic Properties and Saturated Hydraulic Conductivity Pedo-Transfer Function of Rocky Purple Soil. *Acta Pedologica Sinica*, 58(1): 128–139 (in Chinese with English abstract).

Ge, Q., Liang, X., Gong, X. L., et al., 2017. Application

- and Comparison of Various Methods for Determining Hydraulic Conductivity in Saturated Clay-Rich Deposits: A Case Study of Clay-Rich Sediments in North Jiangsu Coastal Plain. *Earth Science*, 42(5): 793–803 (in Chinese with English abstract).
- Huang, M. B., Fredlund, D. G., Fredlund, M. D., 2010. Comparison of Measured and PTF Predictions of SW-CCs for Loess Soils in China. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(2): 105–117. <https://doi.org/10.1007/s10706-009-9284-x>
- Huang, W. X., Deng, Y. S., Xie, F. Q., et al., 2020. Characteristics of Soil Saturated Hydraulic Conductivity on Different Positions and Their Controlling Factors of Granite Collapsing Gullies. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31(7): 2431–2440 (in Chinese with English abstract).
- Julià, M. F., Monreal, T. E., Jiménez, A. S. D. C., et al., 2004. Constructing a Saturated Hydraulic Conductivity Map of Spain Using Pedotransfer Functions and Spatial Prediction. *Geoderma*, 123(3–4): 257–277. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.02.011>
- Kumar, S., Lai, R., Liu, D. S., 2012. A Geographically Weighted Regression Kriging Approach for Mapping Soil Organic Carbon Stock. *Geoderma*, 189–190: 627–634. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.05.022>
- Li, H. X., Liu, J. L., Zhu, A. N., et al., 2010. Comparison Study of Soil Pedo-Transfer Functions in Estimating Saturated Soil Hydraulic Conductivity at Tianranwenyanqu Basin. *Soils*, 42(3): 438–445 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. D., Shao, M. A., Zhao, C. L., 2019. Spatial Variability and Simulation of Soil Hydraulic Parameters in Arid Northwest China. *Arid Zone Research*, 36(6): 1325–1332 (in Chinese with English abstract)
- Li, Y., Chen, D., White, R. E., et al., 2007. Estimating Soil Hydraulic Properties of Fengqiu County Soils in the North China Plain Using Pedo-Transfer Functions. *Geoderma*, 138(3–4): 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.11.018>
- Liao, K. H., Xu, S. H., Wu, J. C., et al., 2012. A Method Based on Principal Component Analysis and Artificial Neural Network for Estimating Soil Hydraulic Properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 43(3): 333–338 (in Chinese with English abstract).
- Liu, K., Huang, G. H., 2019. Joint State and Parameter Estimation of Two-Dimensional Soil Water Flow Model Based on Ensemble Kalman Filter Method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 50(3): 399–408 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. X., Shu, Q. S., Wang, Z. Y., 2007. Applying Pedo-Transfer Functions to Simulate Spatial Heterogeneity of Cinnamon Soil Water Retention Characteristics in Western Liaoning Province. *Water Resources Management*, 21(10): 1751–1762. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9125-0>
- Liu, T. Q., Wang, B. G., Zhang, J. S., et al., 2021. Variation Law and Influencing Factors of Soil Saturated Hydraulic Conductivity in Jiangnan Plain. *Earth Science*, 46(2): 671–682 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Y. W., Ren, Z. P., Ge, Y., et al., 2020. Analysis on Spatio-Temporal Patterns and Drivers of Poverty at Village Level Based on PCA-GWR. *Journal of Geo-Information Science*, 22(2): 231–245 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. F., Li, S. Q., Pan, X. H., 2015. A Review on Development of the Yellow River Alluvial Fan. *Acta Geographica Sinica*, 70(1): 49–62 (in Chinese with English abstract).
- Qiao, J. B., 2019. Study On The Soil Physical Properties of The Deep Profile of the Critical Zone of the China's Loess Plateau and Their Pedotransfer Functions (Dissertation). Northwest A & F University, Yangling (in Chinese with English abstract).
- Qu, M. K., Li, W. D., Zhang, C. R., et al., 2014. Geographically Weighted Regression and Its Application Prospect in Soil and Environmental Sciences. *Soils*, 46(1): 15–22 (in Chinese with English abstract).
- Rawls, W. J., Gish, T. J., Brakensiek, D. L., 1991. Estimating Soil Water Retention from Soil Physical Properties and Characteristics. In: Stewart, B. A., ed., *Advances in Soil Science*. Springer, New York, 213–234. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3144-8_5
- Saxton, K. E., Rawls, W. J., Romberger, J. S., et al., 1986. Estimating Generalized Soil-Water Characteristics from Texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50(4): 1031–1036. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000040039x>
- Sun, L., Liu, T. X., Duan, L. M., et al., 2015. Prediction of Saturated Hydraulic Conductivity of Surface Soil in sand-Dune-and-Meadow Interlaced Region of Horqin with pedo-Transfer Functions Method. *Acta Pedologica Sinica*, 52(1): 68–76 (in Chinese with English abstract).
- Sun, M., Zhang, X. L., Feng, S. Y., et al., 2014. Pedo-Transfer Function for Saturated Hydraulic Conductivity of Agricultural Soil Based on Cross-Validation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(12): 1–7 (in Chinese with English abstract).

- tions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 45(10): 147—152 (in Chinese with English abstract).
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., 1990. Estimating Unsaturated Hydraulic Conductivity from Easily Measured Soil Properties. *Soil Science*, 149(1): 1—12. <https://doi.org/10.1097/00010694-199001000-00001>
- Wang, G. L., Zhou, S. L., Zhao, Q. G., 2005. Volume Fractal Dimension of Soil Particles and Its Applications to Land Use. *Acta Pedologica Sinica*, 42(4): 545—550 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. M., Ni, W. K., 2022. Prediction Model of Saturated/Unsaturated Permeability Coefficient of Compacted Loess with Different Dry Densities. *Rock and Soil Mechanics*, 43(3): 729—736 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. L., Zhao, Y. G., Zhao, S. W., et al., 2016. Study on Soil Saturated Hydraulic Conductivity and Its Influencing Factors in Typical Grassland of Farmland Conversion. *Acta Agrestia Sinica*, 24(6): 1254—1262 (in Chinese with English abstract).
- Wösten, J. H. M., Lilly, A., Nemes, A., et al., 1999. Development and Use of a Database of Hydraulic Properties of European Soils. *Geoderma*, 90(3—4): 169—185. [https://doi.org/10.1016/s0016-7061\(98\)00132-3](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(98)00132-3)
- Yang, S. H., Zhang, H. T., Guo, L., et al., 2015. Spatial Interpolation of Soil Organic Matter Using Regression Kriging and Geographically Weighted Regression Kriging. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 26(6): 1649—1656 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Huang, X., She, D. L., 2020. Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Soil Saturated Hydraulic Conductivity in the Loess Hilly Region of Northwestern Shanxi. *Journal of Soil and Water Conservation*, 34(6): 178—184 (in Chinese with English abstract).
- Yao, S. X., Zhao, C. C., Zhang, T. H., 2013. A Comparison of Soil Saturated Hydraulic Conductivity (K_f) in Different Horqin Sand Land. *Acta Pedologica Sinica*, 50(3): 469—477 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Liang, X., Liu, Y. F., et al., 2023. CoKriging Method Based on Principal Components to Predict Spatial Distribution of Arsenic in Groundwater. *Earth Science*, 48(10): 3820—3831 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, C. L., Shao, M. A., Jia, X. X., 2014. Distribution and Simulation of Saturated Soil Hydraulic Conductivity at a Slope of Northern Loess Plateau. *Advances in Water Science*, 25(6): 806—815 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, H., Han, L., Shojaaddini, A., 2021. Predicting Saturated Hydraulic Conductivity by Peto-Transfer Function and Spatial Methods in Calcareous Soils. *Journal of Applied Geophysics*, 191: 104367. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104367>
- Zou, G. H., Li, Y., Li, Y. Y., et al., 2013. Developing a Peto-Transfer Function for Estimating Saturated Soil Hydraulic Conductivity of Paddy Soils of a Catchment in Southern Subtropical China. *Chinese Journal of Soil Science*, 44(2): 302—307 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 房丽晶,高瑞忠,刘廷玺,等,2020. 巴拉格尔河流域土壤传递函数构建与评估. 干旱区研究,37(5): 1156—1165.
- 高鹏飞,冉卓灵,韩珍,等,2021. 含岩屑紫色土水力特性及饱和导水率传递函数研究. 土壤学报, 58(1): 128—139.
- 葛勤,梁杏,龚绪龙,等,2017. 不同饱和黏性土渗透系数预测方法的应用与对比: 以苏北沿海平原黏土为例. 地球科学, 42(5): 793—803.
- 黄婉霞,邓羽松,谢福倩,等,2020. 花岗岩崩岗不同部位土壤饱和导水率特征及其影响因素. 应用生态学报,31(7): 2431—2440.
- 李慧霞,刘建立,朱安宁,等,2010. 预测天然文岩渠流域土壤饱和导水率的土壤转换函数方法比较研究. 土壤, 42(3): 438—445.
- 李祥东,邵明安,赵春雷,2019. 西北干旱区土壤水力参数空间变异与模拟. 干旱区研究,36(6): 1325—1332.
- 廖凯华,徐绍辉,吴吉春,等,2012. 一种基于PCA和ANN的土壤水力性质估计方法. 水利学报, 43(3): 333—338.
- 刘琨,黄冠华,2019. 基于集合卡尔曼滤波法的二维土壤水流状态变量和参数联合估计. 水利学报, 50(3): 399—408.
- 刘天奇,汪丙国,张钧帅,等,2021. 江汉平原土壤饱和渗透系数变化规律及影响因素. 地球科学, 46(2): 671—682.
- 罗耀文,任周鹏,葛咏,等,2020. 基于PCA-GWR方法的村级贫困时空格局及致贫因素分析. 地球信息科学学报, 22(2): 231—245.
- 马玉凤,李双权,潘星慧,2015. 黄河冲积扇发育研究述评. 地理学报, 70(1): 49—62.
- 乔江波,2019. 黄土高原关键带深剖面土壤物理性质及传递函数研究(博士学位论文). 杨凌: 西北农林科技大学.
- 瞿明凯,李卫东,张传荣,等,2014. 地理加权回归及其在土壤和环境科学上的应用前景. 土壤, 46(1): 15—22.
- 孙丽,刘廷玺,段利民,等,2015. 科尔沁沙丘-草甸相间地区表土饱和导水率的土壤传递函数研究. 土壤学报, 52(1): 68—76.
- 孙美,张晓琳,冯绍元,等,2014. 基于交叉验证的农田土壤

- 饱和导水率传递函数研究. 农业机械学报, 45(10): 147—152.
- 王国梁, 周生路, 赵其国, 2005. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用. 土壤学报, 42(4): 545—550.
- 王海曼, 倪万魁, 2022. 不同干密度压实黄土的饱和/非饱和渗透系数预测模型. 岩土力学, 43(3): 729—736.
- 王子龙, 赵勇钢, 赵世伟, 等, 2016. 退耕典型草地土壤饱和导水率及其影响因素研究. 草地学报, 24(6): 1254—1262.
- 杨顺华, 张海涛, 郭龙, 等, 2015. 基于回归和地理加权回归Kriging的土壤有机质空间插值. 应用生态学报, 26(6): 1649—1656.
- 杨震, 黄萱, 余冬立, 2020. 晋西北黄土丘陵区土壤饱和导水率的空间分布特征及影响因素. 水土保持学报, 34(6): 178—184.
- 姚淑霞, 赵传成, 张铜会, 2013. 科尔沁不同沙地土壤饱和导水率比较研究. 土壤学报, 50(3): 469—477.
- 张洁, 梁杏, 刘延锋, 等, 2023. 基于主成分的协克里金法对地下水砷空间分布预测. 地球科学, 48(10): 3820—3831.
- 赵春雷, 邵明安, 贾小旭, 2014. 黄土高原北部坡面尺度土壤饱和导水率分布与模拟. 水科学进展, 25(6): 806—815.
- 邹刚华, 李勇, 李裕元, 等, 2013. 亚热带小流域稻田土壤饱和导水率传递函数构建. 土壤通报, 44(2): 302—307.