

石川河富平地下水渗透系数空间变异性研究

王继玲, 周维博, 孙梨梨, 王奕劼

Study on the spatial variability of hydraulic conductivity of underground reservoir in Fuping section of Shichuan River

WANG Jiling, ZHOU Weibo, SUN Lili, and WANG Yimeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202206021>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

荒漠-湿地生态系统区盐渍土特征及空间变异性

Characteristics and spatial variability of saline soil in desert-wet ecosystem area, Gansu Province, China

魏玉涛, 刘德玉, 张伟, 喻生波, 吴耀坤 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 183-190

基于相关指标的裂隙岩体渗透系数估算模型研究

A model for estimating hydraulic conductivity of fractured rock mass based on correlation indexes

王玮, 钱家忠, 马雷, 王德健, 马海春, 赵卫东 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 82-89

裂隙宽度空间变异性及泄漏条件对网络裂隙中DNAPLs运移影响研究

Effects of spatial variability of fracture width and leakage conditions on the migration of DNAPLs in network fractures

常兴, 骆乾坤, 邓亚平, 马雷, 钱家忠 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 174-181

基于遗传算法-支持向量机的滑坡渗透系数反演

Estimation of hydraulic conductivity of landslides based on support vector machine method optimized with genetic algorithm

胡鹏, 文章, 胡新丽, 张玉明 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 160-168

上新世红土微观结构参数与渗透系数的变化关系研究

A study of the relationship between the coefficient of permeability and microstructure of the Pliocene laterite

杨玉茹, 李文平, 王启庆 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 153-160

运用地下水对潮汐的响应识别压力传导系数

Identification of hydraulic conductivity using the response of groundwater levels to oceanic tide

阳玲, 杜金月, 王同科, 赵志学, 郝永红 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 26-30



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202206021

王继玲, 周维博, 孙梨梨, 等. 石川河富平地下水渗透系数空间变异性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 34-43.
WANG Jiling, ZHOU Weibo, SUN Lili, *et al.* Study on the spatial variability of hydraulic conductivity of underground reservoir in Fuping section of Shichuan River [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 34-43.

石川河富平地下水渗透系数空间变异性研究

王继玲^{1,2}, 周维博^{1,2}, 孙梨梨^{1,2}, 王奕劼^{1,2}

(1. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室 (长安大学), 陕西 西安 710054)

摘要: 渗透系数的空间变异性研究是进行地下水人工回灌的基础。为研究石川河富平地下水渗透系数的空间变化规律, 引入 Box-Cox 变换及 Johnson 变换对库区 65 组野外双环渗水试验及勘探孔数据进行预处理, 并以变异函数为工具, 运用传统统计学和地统计学方法分析渗透系数的空间变异性。结果表明: 库区等效渗透系数变化范围为 0.02 ~ 6.44 m/d, 既服从对数正态分布也服从 Box-Cox 变换的正态分布。渗透系数空间相关程度中等, 最优拟合模型为高斯模型。基于最优模型, 渗透系数插值结果整体上呈现西北方向较大、东南方向较小的特点, 在梅家坪镇及南社乡附近最大, 范围为 2.84 ~ 6.44 m/d, 空间变异尺度小; 在觅子乡、庄里镇附近变化明显, 空间变异尺度大; 在东上官乡南部最小, 均小于 0.2 m/d, 变异尺度小。空间变异受地形、地貌、地层岩性、水文气象条件、试验点及勘探点分布、人类活动等因素的综合影响。回灌位置应选择梅家坪镇等渗透系数大, 空间变异尺度小及受人为扰动影响小的地段。研究结果可为地下水回灌建设提供理论参考。

关键词: 渗透系数; 空间变异性; Box-Cox 变换; Johnson 变换; 地下水

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)03-0034-10

Study on the spatial variability of hydraulic conductivity of underground reservoir in Fuping section of Shichuan River

WANG Jiling^{1,2}, ZHOU Weibo^{1,2}, SUN Lili^{1,2}, WANG Yimeng^{1,2}

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of the Ministry of Education (Chang'an University), Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The study on the spatial variability of hydraulic conductivity is the basis for artificial recharge of groundwater reservoir. In order to study the spatial variability of the hydraulic conductivity of underground reservoirs in Fuping section of Shichuan River, Box-Cox transform and Johnson transform were introduced to preprocess the field double-loop percolation test and exploration hole data. Traditional statistical methods and geostatistical methods were applied to analyze the hydraulic conductivity of the reservoir area with the variation function as a tool. The results show that the hydraulic conductivity of the reservoir area varies from 0.02 m/d to 6.44 m/d and obeys both logarithmic normal distribution and Box-Cox transformation normal distribution, the spatial correlation of the hydraulic conductivity is medium, and the best fitting model is Gaussian model. The

收稿日期: 2022-06-15; 修订日期: 2022-07-18

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 陕西省水利科技计划项目 (2021slkj-16); 中国地质调查局地质调查项目 (12120113004800)

第一作者: 王继玲 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事水文地质方面的研究。E-mail: 2304820352@qq.com

通讯作者: 周维博 (1956-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源与水环境和地下水方面的研究。E-mail: zwbzyz823@163.com

Kriging interpolation results based on the optimal model show that the hydraulic conductivity as a whole is larger in the northwest and smaller in the southeast. The hydraulic conductivity is the largest near Meijiaping Township and Nanshe Township, ranging from 2.84 m/d to 6.44 m/d, with small spatial variation scale. It varies significantly near Mizi Township and Zhuangli Township, with large spatial variation scale. It is the smallest in the south of Dongshangguan Township, all less than 0.2 m/d, with small variation scale. The spatial variation is influenced by the combination of topography, geomorphology, distribution of stratigraphic lithology, hydro-meteorological conditions, distribution of test sites and exploration sites, human activities and other factors. The location of recharge should be chosen in Meijiaping town and other locations with large hydraulic conductivity, small spatial variation scale and low influence by human disturbance. The research results can provide theoretical references for the construction of underground reservoirs.

Keywords: hydraulic conductivity; spatial variability; Box-Cox transformation; Johnson transformation; underground reservoir

渗透系数是表征含水层透水性的重要水文地质参数,其空间变异性是水文地质学的一个重要研究课题。20世纪70年代以来,研究水文地质参数空间变异性成为了热点^[1-6]。许多学者采用传统统计学及地统计学方法对渗透系数空间变异性进行研究。从渗透系数的统计学特征来看,Cheng等^[7]对普拉特河河床沉积物渗透系数的研究结果显示,在移除相关样本后,普拉特河河床沉积物的渗透系数服从正态分布;施小清等^[8]利用Borden含水层试验数据对渗透系数进行研究,结果认为若处理方法得当,渗透系数服从对数正态分布;陈宝辉等^[9]对巴音河下游河床渗透系数统计分析结果表明渗透系数服从正态分布。从渗透系数的空间变异性看,沈鹏云^[10]、米海存等^[11]、葛佳亮等^[12]利用半变异函数对渭河的河床及河漫滩沉积物渗透系数进行了空间变异性研究,得出渭河河床渗透系数具有空间自相关性,指数模型拟合效果最佳;河漫滩沉积物的渗透系数具有较强的空间变异性,空间相关性较弱,但均具有空间自相关性,高斯模型或指数模型可以较好地模拟该空间变化规律。吕敬等^[13]得出泾阳县南塬耕植土下部黄土层饱和渗透系数空间变异性较强,该地区不同黄土层饱和渗透系数由高斯模型拟合最佳;同一黄土层垂直方向饱和渗透系数由指数模型拟合最佳;黄土层水平方向饱和渗透系数由线性模型拟合最佳。

关于渗透系数空间变异性的研究已有了大量成果。根据上述研究结果,在原数据不服从正态分布的情况下,多选用单一的对数变换对数据进行正态分布转换,采用多种数据变换方法进行正态转换适宜性及有效性对比分析的研究较少。多数学者的研究对象

为河床及黄土的渗透系数,针对地下水库区域的渗透系数研究较少。且大多研究旨在为地下水数值模拟提供可靠的参数分区以及分析渗透系数空间变异性对地表水与地下水相互作用和溶质运移的影响^[14-16],鲜有研究目的在于为地下水回灌位置提供参考。

陕西省石川河富平地区地表水资源短缺,地下水的持续大量开采,导致石川河平原河谷区部分地区地下水水位已降至潜水底板。在此情形下,利用回灌补给技术在石川河富平地区修建地下水工程,以保护利用地下水资源,对陕西省生态文明建设及黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义。渗透系数是影响回灌的重要因素^[17],其在平面或剖面上都具有不同程度的变异性,即具有空间变异性。就某一地段而言,渗透系数在剖面上的变异性影响了整体地层的入渗能力,从而影响了回灌补给效果;对于库区来说,不同地段整体地层的渗透系数在平面上的变异性决定了地下水回灌选址。因此,本文基于野外双环渗水试验及勘探孔地层数据,采用统计学方法,开展石川河富平地下水渗透系数的空间变异性研究,查明石川河富平地下水渗透系数在空间上的分布以及变异性特点,以为后续地下水工程提供理论依据。

1 研究区概况

陕西省石川河富平地下水工程位于富平县石川河干流庄里镇至下游县域干流出口处。石川河阶地区有少量径流为当地小型水利水保工程拦蓄,很难形成地表径流,造成富平段石川河河道几乎连年干枯,成为名符其实的干河。由于地表水资源的缺乏,区内城

乡居民生活、工农业生产的用水以地下水为主。多年连续大量开采地下水,造成了区域地下水水位普遍下降,出现了不同程度的地下水漏斗区,区域潜水含水层大部分被疏干,形成了较大的地下水疏干空间,具备修建地下水库的有利条件。

本次研究区为陕西省石川河富平地下水库(图1),面积为149.30 km²,研究区主要为河谷区,河谷区主要地貌包括漫滩、一级阶地、二级阶地。河谷区内地层主要为第四系,漫滩沿石川河两岸断续分布且不对称,一般宽20~500 m,下游最宽达1200 m。堆积物为全新统晚期冲积层,厚4~25 m,其下为全新统早期的冲积层。低漫滩高出河床0.5~1.0 m,地层岩性主要为砂砾卵石、细砂、圆砾、粉质黏土。高漫滩高出河床1~2 m,地层岩性主要为黏质砂土、砂砾卵石、黄土及砂质黏土层。一级阶地为石川河谷发育最好分布最广的阶地,呈陡坎与高漫滩接触,上游与漫滩高差5~8 m,下游高差10~15 m,阶面平坦微有起伏,阶面标高410~600 m,宽100~4400 m,最宽处在庄里、南社一带。阶地堆积物为全新统早期的砂质黏土、黏质砂土和砂砾卵石层。阶地基座为中更新统洪积层。二级阶地在东岸断续分布于梅家坪、东上官一带,宽约1 km,以东上官地区发育最为完整。堆积物为上更新统早期的砂质黏土、黏质砂土和砂砾卵石层,上覆15~20 m厚的马兰黄土,砂砾石层厚5~10 m,总厚40~50 m。阶地基座为中更新统洪积层或风积层,厚40~50 m。冲洪积层间无稳定的黏土类地层分布。

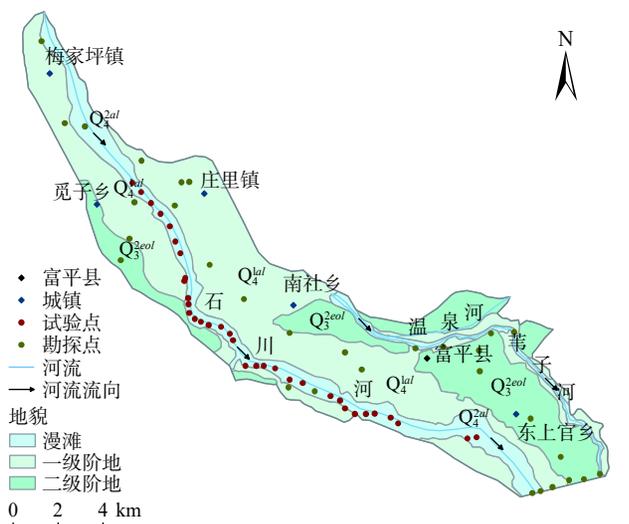


图1 研究区范围及渗透系数点位分布图

Fig. 1 Scope of the study area and the location distribution of hydraulic conductivity points

2 数据来源及方法

通过收集石川河富平地下水库的钻孔资料及试验数据,共获得65个点位的地层数据,点位分布见图1,其中,34个试验点数据(S-1~S-34)。综合野外双环渗水试验和实验室测试以及钻孔地层资料得出,钻孔深约80 m,试验点由西北—东南依次分布。31个勘探点数据(1~31)来源于已有的勘探孔资料,勘探孔深56~205 m。以地面为上界,潜水面上部地层为下界,潜水埋深14~64 m,经式(1)计算出65个点位的等效渗透系数,见表1。

$$K_v = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{\sum_{i=1}^n \frac{M_i}{K_i}} \quad (1)$$

式中: K_v ——等效渗透系数;

M_i ——各岩层厚度;

K_i ——各岩层渗透系数。

在对渗透系数进行统计分析时,多数学者采用对数变换对渗透系数进行正态转换,采用多种变换方法对比分析渗透系数统计特征的研究较少。Box-Cox变换及Johnson变换作为2种数据变换方法,对数据的正态性具有良好的改善效果已广泛应用在其他研究领域^[18-19]。本文特引入Box-Cox变换及Johnson变换^[20]对库区渗透系数进行正态分布转换,比较上述3种变换方法对库区渗透系数统计分析的适宜性。

2.1 Box-Cox变换

Box-Cox变换是统计建模中常用的一种数据变换方法,该变换可以明显地改善数据的正态性、对称性和方差相等性。

Box-Cox变换的一般形式为:

$$y(\lambda) = \begin{cases} \frac{y^\lambda - 1}{\lambda} & \lambda \neq 0 \\ \ln y & \lambda = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $y(\lambda)$ ——经Box-Cox变换后得到的新变量;

y ——原始连续因变量;

λ ——变换参数。

变换参数 λ 的估计值采用极大似然估计法获得。

由式(2)可见,当 $\lambda=0$ 时,即为对数变换。

2.2 Johnson变换

Johnson变换由In-Kwon Yeo及Richard A. Johnson正式提出。当随机变量正态性较差时,对其使用Johnson变换进行预处理,有利于对该随机变量进行基于

表 1 各点位岩层厚度及等效渗透系数

Table 1 Statistical results of rock thickness and hydraulic conductivity at each point

编号	岩层厚度/m	等效渗透系数/(m·d ⁻¹)	编号	岩层厚度/m	等效渗透系数/(m·d ⁻¹)	编号	岩层厚度/m	等效渗透系数/(m·d ⁻¹)
S-1	41.50	1.20	S-23	38.50	0.15	11	56.20	0.56
S-2	46.00	1.26	S-24	36.00	0.34	12	52.70	0.58
S-3	39.10	5.68	S-25	24.90	0.16	13	53.30	0.90
S-4	47.20	0.93	S-26	14.80	0.02	14	59.15	1.79
S-5	54.10	1.45	S-27	17.00	0.22	15	39.00	0.39
S-6	54.70	0.62	S-28	23.50	0.37	16	31.90	0.93
S-7	44.00	1.26	S-29	21.00	0.11	17	59.70	0.29
S-8	55.10	0.48	S-30	20.20	0.14	18	31.60	0.21
S-9	54.40	0.44	S-31	15.00	0.17	19	40.60	0.37
S-10	51.30	2.90	S-32	18.00	0.10	20	57.50	0.32
S-11	52.80	1.24	S-33	36.00	0.09	21	59.00	0.51
S-12	53.80	1.07	S-34	37.20	0.06	22	56.04	0.36
S-13	53.90	3.08	1	23.80	6.44	23	56.04	0.40
S-14	44.30	0.10	2	28.80	1.54	24	65.20	0.14
S-15	52.70	2.03	3	31.00	1.12	25	63.80	0.11
S-16	53.00	2.09	4	39.60	0.50	26	15.10	0.03
S-17	46.10	2.34	5	43.50	0.11	27	26.30	0.02
S-18	38.30	5.92	6	39.00	0.17	28	36.90	0.05
S-19	38.80	0.08	7	52.20	0.15	29	48.10	0.02
S-20	42.50	1.46	8	53.20	0.56	30	39.50	0.03
S-21	44.00	0.28	9	53.10	0.81	31	41.90	0.02
S-22	32.50	0.68	10	54.20	0.15			

正态假设的统计分析。

Johnson 变换的一般形式为:

$$Z = \alpha + \delta g\left(\frac{X - \zeta}{\varepsilon}\right) \quad (3)$$

式中: ζ ——位置参数;

ε ——尺度参数, $\varepsilon > 0$;

α, δ ——形状参数, $\delta > 0$;

$g(\cdot)$ ——变换函数, 包括 3 种类型(表 2)。

表 2 变换函数类型

Table 2 Transformation function type

一般公式	分布类型
$Z = \alpha + \delta \ln(X - \zeta), X > \zeta$	X服从Johnson S _L 分布(即对数分布)
$Z = \alpha + \delta \ln\left(\frac{X - \zeta}{\zeta + \varepsilon - X}\right), \zeta < X < \zeta + \varepsilon$	X服从Johnson S _B 分布
$Z = \alpha + \delta \sinh^{-1}\left(\frac{X - \zeta}{\varepsilon}\right) = \alpha + \delta \ln\left(\frac{X - \zeta}{\varepsilon} + \sqrt{1 + \left(\frac{X - \zeta}{\varepsilon}\right)^2}\right)$	X服从Johnson S _U 分布

2.3 变异函数理论模型

变异函数是地统计学^[21]中研究水文地质参数空间变异的关键函数, 是研究样本空间上区域变量空间连续变异的一个连续函数。假设在一维情况下, 区域化变量 $Z(x)$ 在 x_i 和 x_i+h 处的值分别为 $Z(x_i)$ 与 $Z(x_i+h)$, 则 $Z(x)$ 的变异函数为:

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

式中: $\gamma(h)$ ——变异函数;

h ——步长/m;

$N(h)$ ——点间距离为 h 时的样点数。

为了定量描述整个区域的变量特征, 本次选取 3 种模型进行变异函数拟合, 最终选取拟合结果最优的变异函数理论模型^[22], 用以更精确地反映变量的变化规律。3 种模型的数学表达式见表 3。

变量的空间相关程度由块金值 C_0 和基台值 C_0+C 的比值描述, 比值小于 0.25, 表明变量的空间相关性较强, 空间变异主要受结构性因子的影响; 比值介于

表 3 变异函数理论模型

Table 3 Theoretical model of variation function

变异函数理论模型	一般公式	变程
球状模型	$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h=0 \\ C_0 + C \left(\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right), & 0 < h \leq a \\ C_0 + C, & h > a \end{cases}$	a
指数模型	$\gamma(h) = C_0 + C \left(1 - e^{-\frac{h}{a}} \right)$	$3a$
高斯模型	$\gamma(h) = C_0 + C \left(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}} \right)$	$\sqrt{3}a$

注: C_0 为块金值; C 表示空间变量最大的变异程度; C_0+C 为基台值; h 为步长; a 为变程, 表示最大自相关距离, 当距离大于 a 时, 变量相互独立。

0.25 ~ 0.75 之间, 表明变量的空间相关性中等, 空间变异受结构性因子和随机因子共同影响; 比值大于 0.75, 表明变量的空间相关性微弱, 空间变异主要受随机因子的影响。

3 结果分析

3.1 渗透系数特征统计分析

对数据进行正态转换时, Box-Cox 变换的最优变换参数 λ 为 0.05。Johnson 变换的最佳变换类型为表 2 中的 S_B 型, 即原始数据服从 Johnson S_B 分布, 最优变换参数 $(\alpha, \delta, \zeta, \varepsilon)$ 为 (2.175, 0.613, 0.007, 14.030)。利用最优参数计算出新的样本数据, 对数据进行统计分析及正态检验。统计检验结果见图 2, 渗透系数 (K_v) 的范围为 0.02 ~ 6.44 m/d, 通过计算均值 (M) 与标准差 (SD), 可得渗透系数的变异系数 (C_v)。对渗透系数 (K_v) 进行对数变换及 Box-Cox 变换后, 渗透系数的变异系数值减小, 表明对数变换及 Box-Cox 变换可以降低样本的离散度。变换后渗透系数仍呈强变异性。利用偏度 (S_k) 检验渗透系数的正态性时, 当偏度约为 0 时, 可认为分布近似服从正态分布。由偏度计算结果可以看出, 原始数据呈右偏分布, 经过 Box-Cox 变换及 Johnson 变换后的偏度均接近于 0, 渗透系数近似服从正态分布, 可见 Box-Cox 变换及 Johnson 变换对数据的偏度有明显的改善效果。峰度 (K_u) 能反映出渗透系数分布形状的尖峭状况与程度, 原始数据为尖峰分布, 经过 3 种变换后的渗透系数均为平坦分布。通过 K-S 及 S-W 正态检验结果表明, 经过变换后样本显著性 Sig 值大于 0.05, 3 种方法均能将库区渗透系数从非正态分布转化为服从正态分布, 且 3 种变换方法的正态数据转换能力分别为: Johnson 变换 > Box-Cox 变换 > 对数变换。

分析库区渗透系数 K_v 及经过变换后的渗透系数直方图和正态概率分布情况可知, 原始数据拟合的

钟型曲线效果不佳, 正态概率分布稳定性较差。其主要原因是库区渗透系数变化大, 离散度高。经过 3 种方法变换后, 渗透系数拟合的钟型曲线效果明显变好, 体现了 3 种数据变换方法改善样本正态性的能力。

针对本次研究, Box-Cox 变换及 Johnson 变换对数据的偏度及峰度均有明显的改善, 具有良好的正态转换效果。但 2 种方法对数据离散度的影响明显不同, 经 Johnson 变换后渗透系数离散度明显升高, 样本均值的代表性变差。故相较于 Johnson 变换, Box-Cox 变换更适宜对库区渗透系数进行正态分布转换, 在降低渗透系数离散度的同时, 改善数据的正态性。对数变换作为 Box-Cox 变换及 Johnson 变换的一种特殊形式, 对渗透系数的正态性也有较好的改善效果。故本文选用对数变换及 Box-Cox 变换后的库区渗透系数进行空间变异分析。

3.2 渗透系数变异函数拟合

应用地统计学方法时, 一般要求数据服从或近似服从正态分布, 否则会产生一定的比例效应^[23]。试验变异函数值会因为比例效应的存在而产生畸变, 基台值和块金值也会因此增大, 空间变量的结构特征变得不明显, 从而导致克里金插值估计精度降低。故由渗透系数统计特征分析结果, 选用对数变换及 Box-Cox 变换后的渗透系数进行变异函数拟合。

库区渗透系数点间最大距离为 31.99 km。地统计分析软件 GS+ 软件进行函数模型拟合时自动选取点间最大距离值的一半作为滞后距, 本次调整滞后距为 16.00 km, 间距为 1.00 km, 计算库区渗透系数的变异特征参数, 并绘制变异函数曲线图(图 3)。

对数变换及 Box-Cox 变换函数拟合结果均显示高斯模型的拟合效果最优, 拟合度 R^2 分别为 0.835, 0.853, 高于球状及指数模型; 残差 RSS 分别为 0.452, 0.497, 低于其他 2 种模型。经 Box-Cox 变换后的渗透系数与高斯模型的拟合度优于对数变换。经 Box-Cox 变换后的渗透系数与高斯模型的拟合度优于对数变换。故选取 Box-Cox 变换的渗透系数与高斯模型拟合的计算结果进行分析。

由高斯模型计算结果可知, 半方差函数存在块金值 (C_0), 即渗透系数的空间位置非常接近时, 仍存在变异, 渗透系数的空间连续性差。渗透系数的计算变程 a 为 19.51 km, 表明其于 19.51 km 处发生变异, 当点间距大于 19.51 km 时, 自相关函数的值为 0, 方差函数值趋于稳定, 渗透系数具有明显的空间变异性。即当

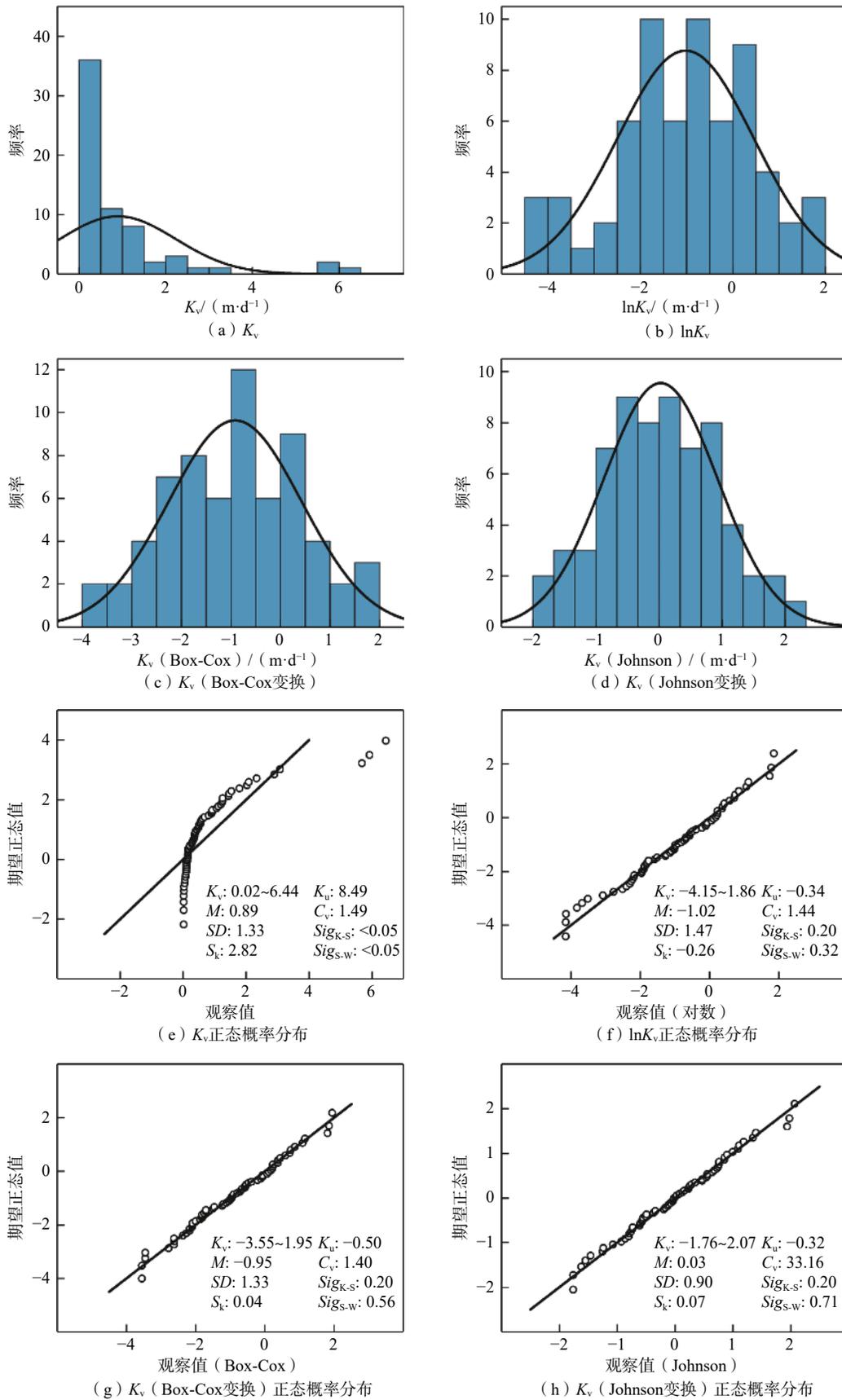


图 2 渗透系数直方图与正态概率分布图

Fig. 2 Hydraulic conductivity histogram and normal probability distribution

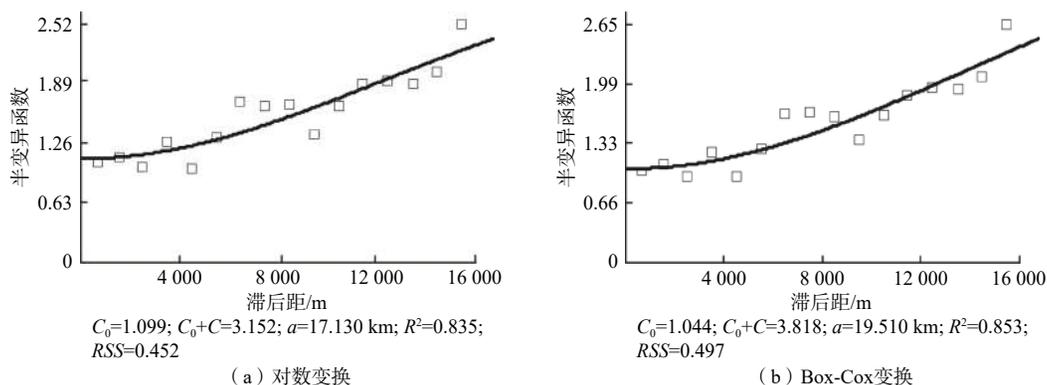


图 3 渗透系数高斯模型拟合

Fig. 3 Gaussian model fitting of hydraulic conductivity

点间距小于 19.51 km 时, 渗透系数存在空间上的相关关系, 可以将其作为区域化变量处理; 当点间距大于 19.51 km 时, 渗透系数不具有空间相关关系, 可以将其看作相互独立的随机变量。块金值(C_0)和基台值(C_0+C)的比值为 0.273, 大于 0.25, 表明渗透系数的空间相关性中等, 结构性因子和随机因子对变量的空间变异影响程度相同。空间变异受地形、地貌、地层岩性、水文气象条件、试验点及勘探点分布、人类活动等因素的综合作用。

3.3 渗透系数空间插值

对渗透系数进行半变异函数拟合后, 建立了最优理论模型, 即高斯模型。依据高斯模型, 采用克里金插值法^[24-25]对 Box-Cox 变换后的渗透系数进行空间插值, 分析库区渗透系数的空间分布规律。

在交叉验证后进行克里金插值, 将插值结果进行渗透系数还原, 得到渗透系数等值线图见图 4。对各点位原始渗透系数与还原后的渗透系数进行误差分析, 由图 5 可见, 2 组数据整体离散度小, 拟合度高, 相关系数达到 0.999, 仅个别点渗透系数存在较小误差, 相

对误差在 -7.79% ~ 7.14% 之间, 均小于 10%, 模型变换及插值结果合理。库区的渗透系数整体上呈现西北方向较大、东南方向较小的特点, 在梅家坪镇及南社乡附近最大, 空间变异尺度小; 在兔儿乡、庄里镇附近变化明显, 空间变异尺度大; 在东上官乡南部最小, 变异尺度小。

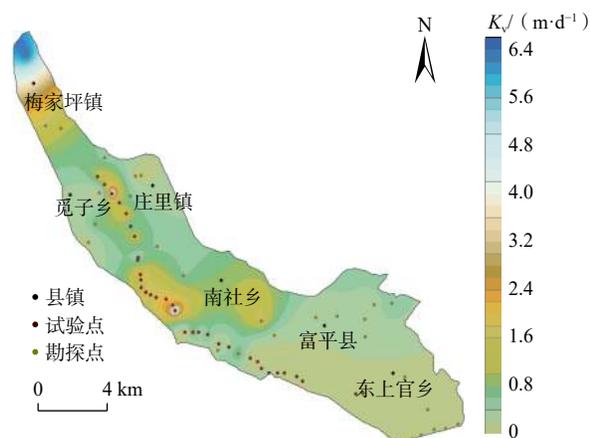


图 4 渗透系数等值线图

Fig. 4 Contour plot of hydraulic conductivity

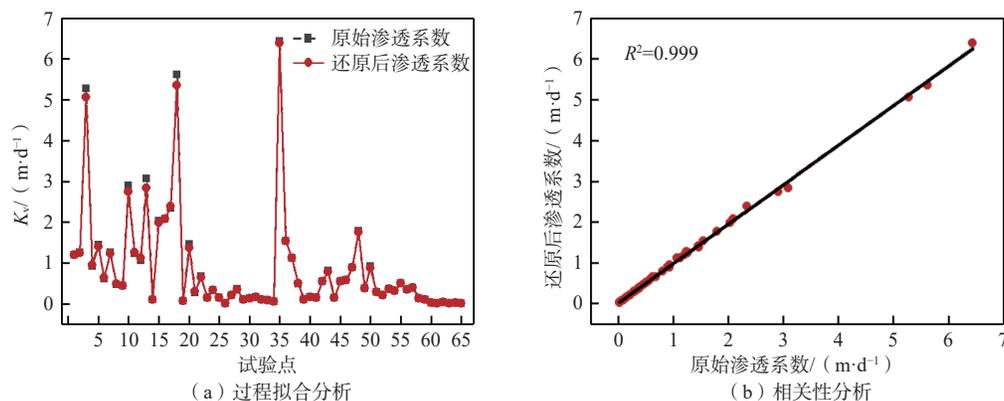


图 5 渗透系数误差分析

Fig. 5 Error analysis of hydraulic conductivity

结合库区地层岩性情况分析,梅家坪镇附近地区潜水面以上地层厚度为 23~31 m,地层岩性以砂砾卵石层为主,透水性良好。南社乡附近上覆 30~50 m 厚的圆砾及砂砾卵石层,中间不连续分布着 10~12 m 厚的黄土或砂质黏土层。渗透系数在剖面上空间变异尺度小,渗透系数大的地层分布广泛,综合求得各点的整体地层渗透系数较大,渗透系数值接近,平面上空间变异尺度小,插值结果显示此处渗透系数值大,符合地层岩性分布情况。通过以往的研究^[4, 15, 23]总结出,地貌类型条件是渗透系数大尺度空间变异的重要因素。觅子乡、庄里镇附近地貌类型主要为漫滩、一级阶地、二级阶地,一级阶地作为石川河谷发育最好分布最广的阶地,在此处占地面积也最大。漫滩区砂砾卵石层等渗透系数大的地层分布广泛,一、二级阶地黏土层分布多、厚度大。剖面上地层岩性分布的不均直接导致了各点具有不同程度的空间变异,渗透系数在此处变异尺度大。东上官乡南部漫滩发育情况不如北部,一级阶地发育不好,二级阶地缺失,地层岩性以黏土为主,含泥量大,岩层透水性较差,渗透系数在此处变异尺度小,总体偏小。综上,克里金插值结果与地层岩性的实际分布情况相符。

根据分析结果,回灌位置的选取应综合考虑渗透系数在平面以及剖面上的变异性,选择在梅家坪镇、南社乡附近等渗透系数大、空间变异尺度小的地方,避开觅子乡、庄里镇附近空间变异尺度大以及东上官乡南部等渗透系数小的地方。

4 讨论

通过对渗透系数进行正态转换,3种数据变换方法的正态数据转换能力分别为:Johnson变换>Box-Cox变换>对数变换。这与杨洁荣等^[26]关于Johnson变换及Box-Cox变换在过程能力分析中效果的研究结果一致。在同时服从正态分布的情况下,经Box-Cox变换后的数据与半变异函数拟合的效果更佳,故对数据进行预处理时应多采用几种方法进行比较,确定适宜的数据转换方法。

郭志奇^[27]通过分析石川河河漫滩渗透性能,得出了石川河河道表层(1~2 m)岩性的渗透系数由西北—东南逐渐减小的变化特征。石川河河谷区潜水埋深14~64 m,赋存相对厚度的砂砾卵石层,具备良好的地下水调蓄空间。本文结合河谷区勘探孔56~205 m地层资料,计算等效渗透系数,分析其在平面及剖面上的空间变化规律,选择出了如梅家坪镇等适宜的入

渗补给区。

渗透系数的空间变异是地形、地貌、地层岩性、水文气象条件、试验点及勘探点分布、人类活动等因素综合作用的结果。库区地层主要为第四系,上部广泛分布有中更新统晚期、上更新统及全新统的厚层砂砾卵石层,底部为中更新统洪积的厚层黏土、砂质黏土夹薄砂层或风积的黄土层,石川河下游出口处与渭河冲积平原接触地带为含泥量大的石川河冲洪积层与渭河细粒相的冲湖(沼)积层交互沉积,地层透水性极差,有利于库区地下水的贮存^[28]。库区漫滩堆积物主要为全新统晚期冲积层黏质砂土、砂砾卵石及砂质黏土层;一级阶地堆积物为全新统早期的砂质黏土、黏质砂土、黄土和砂砾卵石层;二级阶地堆积物为上更新统早期的砂质黏土、粉质黏土、黄土和砂砾卵石层。不同地貌类型的地层岩性及厚度是影响渗透系数空间变异的重要因素。石川河河道整治及人工开挖采砂砾卵石活动,对河道表层渗透性造成了严重影响,在受到采砂干扰较大的地段,其上部12~18 m厚的砂砾卵石层被采石场挖走,砂石坑分布多,回填土多为采石后的粉质黏土、黏土等杂填土,其透水能力明显变弱。机械碾压等人类活动对河道表层的岩性、密实度等也造成了一定影响,河道表层的渗透能力较原始地层明显减弱。受此影响,漫滩区地层的渗透能力弱于原始地层,大部分点的等效渗透系数较小,但仍存在少部分未受扰动的地段,其点位地层渗透系数较大。综合地层情况,采用传统统计学方法对渗透系数值进行总体分析时,数据离散度大,其分布呈强变异性。结合试验点及勘探点的空间位置分析,渗透系数空间相关性中等。

5 结论

(1)库区渗透系数值分布在0.02~6.44 m/d之间,均值为0.89 m/d。变异系数大于1,具有强变异性,经对数变换及Box-Cox变换后数据变异系数均有所减小,数据离散程度得到改善。渗透系数既服从对数正态分布也服从Box-Cox变换的正态分布。

(2)分析渗透系数空间变异性,高斯模型拟合效果最优,库区渗透系数空间相关性中等,当点间距小于19.51 km时,渗透系数具有空间相关性;当点间距大于19.51 km时,渗透系数为相互独立的随机变量,具有明显的空间变异性。空间变异受地形、地貌、地层岩性、水文气象条件、试验点及勘探点分布、人类活动等因素的综合影响。

(3) 渗透系数整体上呈现西北方向较大、东南方向较小的特点, 与地层岩性的实际分布情况相符。回灌位置的选取应综合考虑渗透系数在平面以及剖面上的变异性, 选择在梅家坪镇、南社乡附近等渗透系数大、空间变异尺度小的地方, 避开觅子乡、庄里镇附近空间变异尺度大以及东上官乡南部等渗透系数小的地方。

(4) 受点位分布及人类活动等多种因素影响, 克里金插值得出的渗透系数与实际情况仍存在一定的误差。在后续的研究中, 应多点位均匀布设试验点及勘探孔, 尽可能减少随机因素对渗透系数空间变异性分析结果的干扰, 使分析结果更具准确性。

参考文献 (References) :

- [1] 姜秋香, 付强, 王子龙. 空间变异理论在土壤特性分析中的应用研究进展[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 250 – 253. [JIANG Qiuxiang, FU Qiang, WANG Zilong. Research progress of the spatial variability theory in application to soil characteristic analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(1): 250 – 253. (in Chinese with English abstract)]
- [2] HATCH E C, FISHER T A, RUEHL R C, et al. Spatial and temporal variations in streambed hydraulic conductivity quantified with time-series thermal methods[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(3/4): 276 – 288.
- [3] ZHANG Nan, LI Lin, JIANG Hong, et al. Study on variation rule of permeability coefficient in unsaturated zone along the WeiHe River in the intertidal area[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2018, 208(1): 71 – 78.
- [4] 李金荣, 韩新正, 万红友, 等. 渗透系数的空间变异研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(2): 11 – 13. [LI Jinrong, HAN Xinzheng, WAN Hongyou, et al. Research on the spatial variability of hydraulic conductivity[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(2): 11 – 13. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王开丽, 黄冠华. 二维强非均质含水层中渗透系数空间变异对污染物迁移的影响[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 437 – 445. [WANG Kaili, HUANG Guanhua. Effect of hydraulic conductivity on contaminant transport in highly heterogeneous two-dimensional aquifers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 437 – 445. (in Chinese with English abstract)]
- [6] CHEN Xunhong, SONG Jinxi, WANG Wenke. Spatial variability of specific yield and vertical hydraulic conductivity in a highly permeable alluvial aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2010, 388(3/4): 379 – 388.
- [7] CHENG Cheng, SONG Jinxi, CHEN Xunhong, et al. Statistical distribution of streambed vertical hydraulic conductivity along the Platte River, Nebraska[J]. Water Resources Management, 2011, 25(1): 265 – 285.
- [8] 施小清, 吴吉春, 袁永生. 渗透系数空间变异性研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(2): 210 – 215. [SHI Xiaoqing, WU Jichun, YUAN Yongsheng. Study on the spatial variability of hydraulic conductivity[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(2): 210 – 215. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈宝辉, 王文科, 段磊, 等. 巴音河下游河床渗透系数空间变异性研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(1): 52 – 57. [CHEN Baohui, WANG Wenke, DUAN Lei, et al. Spatial variability of hydraulic conductivity of riverbed sediment in the lower reaches of Bayin River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(1): 52 – 57. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 沈鹏云. 渭河河床沉积物渗透系数空间变异性研究[D]. 西安: 西北大学, 2012. [SHEN Pengyun. Study on the spatial variability of hydraulic conductivity of riverbed sediment in the Weihe River[D]. Xi'an: Northwest University, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 米海存, Chen X H, 何红曼, 等. 渭河河漫滩沉积物渗透性研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(4): 19 – 23. [MI Haicun, CHEN X H, HE Hongman, et al. Determination of hydraulic conductivity of the floodplain in the Weihe River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(4): 19 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 葛佳亮, 严婷, 吕敬, 等. 渭河临潼段漫滩沉积物渗透系数分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 201 – 204. [GE Jialiang, YAN Ting, LV Jing, et al. Analysis of floodplain sediments saturated hydraulic conductivity in Lintong section of Weihe River[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(2): 201 – 204. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 吕敬, 柯贤敏, 张小筱, 等. 泾阳南塬黄土边坡饱和渗透系数变异性分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 254 – 257. [LV Jing, KE Xianmin, ZHANG Xiaoxian, et al. Variability of saturated permeability coefficient of loess slopes in South Jingyang Tableland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 254 – 257. (in Chinese with English abstract)]

- [14] 刘波, 林晓宁, 马红亮, 等. 黄河三角洲沉积物及其渗透系数空间分布特征[J]. 人民黄河, 2018, 40(5): 1 - 6. [LIU Bo, LIN Xiaoning, MA Hongliang, et al. Spatial distribution of particle size and hydraulic conductivity of shallow surface sediments in the Yellow River Delta[J]. Yellow River, 2018, 40(5): 1 - 6. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 宋扬. 灞河橡胶坝库区沉积物渗透系数空间变异及河水—地下水交互作用研究[D]. 西安: 长安大学, 2017. [SONG Yang. Spatial variability of sediment permeability coefficient and river-groundwater interaction in Bahe rubber dam area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 王超, 束龙仓, 鲁程鹏. 渗透系数空间变异性对低渗透地层中地下水溶质运移的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 137 - 142. [WANG Chao, SHU Longcang, LU Chengpeng. Impacts of spatial variability of hydraulic conductivity on solute transport in groundwater of low-permeability stratum[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(2): 137 - 142. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 何满潮, 刘斌, 姚磊华, 等. 地下热水回灌过程中渗透系数研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002(4): 374 - 377. [HE Manchao, LIU Bin, YAO Leihua. Study on hydraulic conductivity during geothermal reinjection[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2002(4): 374 - 377. (in Chinese with English abstract)]
- [18] CUI Ruifei, ZHU Yaguang, ZHANG Huan, et al. BoxCox multi-output linear regression for 10.7 cm solar radio flux prediction[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2021, 21(4): 149 - 158.
- [19] 常浩浩, 宋松柏, 吴海江, 等. 基于Johnson分布的年降水量频率分析[J]. 水力发电学报, 2021, 40(3): 76 - 83. [CHANG Haohao, SONG Songbai, WU Haijiang, et al. Frequency analysis of annual precipitation based on Johnson distribution[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(3): 76 - 83. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 蔡国涛, 乔长录. 基于正态变换的玛纳斯河水文频率研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(3): 21 - 25. [CAI Guotao, QIAO Changlu. Study on hydrological frequency with Manas River based on normal transform[J]. Yellow River, 2022, 44(3): 21 - 25. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 薛佩佩, 文章, 梁杏. 地质统计学在含水层参数空间变异研究中的应用进展与发展趋势[J]. 地质科技通
- 报, 2022, 41(1): 209 - 222. [XUE Peipei, WEN Zhang, LIANG Xing. Application and development trend of geostatistics in the research of spatial variation of aquifer parameters[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(1): 209 - 222. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 荆永滨, 王公忠, 毕林. 矿山离散钻孔样品变异函数模型计算与拟合[J]. 矿冶工程, 2017, 37(4): 19 - 22. [JING Yongbin, WANG Gongzhong, BI Lin. Calculating and fitting variogram models for dispersed mine drill samples[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(4): 19 - 22. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 王友年, 李升, 余斌. 阿克苏河流域渗透系数空间变异性分析[J]. 中国农村水利水电, 2021(1): 64 - 70. [WANG Younian, LI Sheng, YU Bin. Spatial variability analysis of permeability coefficient in Aksu River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(1): 64 - 70. (in Chinese with English abstract)]
- [24] NALDER A I, WEIN W R. Spatial interpolation of climatic Normals: Test of a new method in the Canadian boreal forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 92(4): 211 - 225.
- [25] 李海涛, 邵泽东. 空间插值分析算法综述[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(7): 1 - 8. [LI Haitao, SHAO Zedong. Review of spatial interpolation analysis algorithm[J]. Computer Systems & Applications, 2019, 28(7): 1 - 8. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 杨洁荣, 宋向东, 明喆. Johnson转换与Box-Cox转换相比的优越性[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2010, 28(3): 449 - 452. [YANG Jierong, SONG Xiangdong, MING Zhe. The superiority of Johnson transformation to Box-Cox transformation[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2010, 28(3): 449 - 452. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 郭志奇. 陕西省富平县石川河河道渗透性能分析[J]. 地下水, 2021, 43(6): 82 - 85. [GUO Zhiqi. Analysis of the infiltration performance of the Shichuan River in Fuping County, Shaanxi Province[J]. Ground Water, 2021, 43(6): 82 - 85. (in Chinese)]
- [28] 刘卫岗. 陕西省石川河流域地下水调蓄研究报告[R]. 西安: 陕西省工程勘察研究院, 2015. [LIU Weigang. Study on groundwater storage in Shichuan River Basin of Shaanxi Province[R]. Xi'an: Shaanxi Engineering Investigation and Research Institute, 2015. (in Chinese)]