

保定平原区地下水水位变幅带自由孔隙率空间变异研究

徐步云, 杨会峰, 白 华, 宋 博, 孟瑞芳

Spatial variability of free porosity in the groundwater level fluctuation zone in the Baoding Plain area

XU Buyun, YANG Huifeng, BAI Hua, SONG Bo, and MENG Ruifang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

保定平原区地下水生态水位阈值的探讨

Discussion on ecological water level threshold of groundwater in Baoding Plain area

靳博文, 王文科, 段磊, 马稚桐, 王一, 黄鑫慧 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 166-175

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

含单裂隙非饱和带中轻非水相流体修复的数值模拟

Numerical simulation of light non-aqueous phase liquids remediation in the unsaturated zone with single fractures

赵科锋, 王锦国, 曹慧群 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 43-55

非饱和带二氧化碳入侵对表生植物及土壤的影响

Influence of carbon dioxide invasion in the unsaturated zone on vegetation and soil

潘颖, 赵晓红, 王文科, 邓红章, 韩枫, 罗平平, 杨雨萌, 张徽 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 180-189

漳滏平原漏斗区地下水溶解性总固体演变特征研究

Evolution characteristics of total dissolved solids in the groundwater level funnel area in the Hufu piedmont plain

张希雨, 张光辉, 严明疆 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 72-81

地下水位波动带三氮迁移转化过程研究进展

Advances in researches on ammonia, nitrite and nitrate on migration and transformation in the groundwater level fluctuation zone

刘鑫, 左锐, 王金生, 何柱锟, 李桥 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 27-36



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208004

徐步云, 杨会峰, 白华, 等. 保定平原区地下水水位变幅带自由孔隙率空间变异研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 23-33.
XU Buyun, YANG Huifeng, BAI Hua, *et al.* Spatial variability of free porosity in the groundwater level fluctuation zone in the Baoding Plain area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 23-33.

保定平原区地下水水位变幅带自由孔隙率 空间变异研究

徐步云¹, 杨会峰^{1,2}, 白 华^{1,2}, 宋 博^{1,2}, 孟瑞芳^{1,2}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061;

2. 河北沧州平原区地下水与地面沉降国家野外科学观测研究站, 河北 石家庄 050061)

摘要: 科学确定地下水水位变幅带的地质参数是水资源评价与管理中的重要环节。保定平原近 40 年来强烈开采地下水, 水位持续下降形成规模巨大的厚包气带层, 南水北调工程通水后, 随着河湖生态补水与地下水压采工作的推进, 保定平原局部地区地下水水位止跌回升。回补水量与水位变化的定量关系成为超采治理的一个重要科学问题, 但水位回升条件下的计算中仍用表示释水过程的给水度参数将造成结果偏差, 因此表述水位恢复过程的自由孔隙率参数研究是解决这一问题的重点所在。文章基于保定平原区 67 个工程地质钻孔采样数据, 确定水位变幅带的综合自由孔隙率, 通过趋势分析和结果交叉验证方法遴选半变异函数模型, 结合普通克里金插值方法对未知点进行无偏最优估计。结果显示: (1) 保定平原区水位变幅带综合自由孔隙率的最优半变异函数模型为一阶趋势效应指数模型。数据具有强空间自相关性, 主要受变幅带空间位置、地层类型等结构性因素影响。(2) 综合自由孔隙率分布表现为西南、西北为高值区, 极值可达 0.25, 数值向中部及东部逐步降低, 最小降至 0.02。(3) 与惯用给水度值进行对比, 自由孔隙率值在南部地区整体升高约 0.03, 约为惯用给水度的 1.2 倍。在中部地区降低了约 0.06, 变为惯用给水度值的一半左右。研究成果对南水北调受水区生态补水与水资源调控具有重要研究价值和借鉴意义。

关键词: 自由孔隙率; 给水度; 非饱和带; 地质统计; 空间变异; 保定平原区

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)03-0023-11

Spatial variability of free porosity in the groundwater level fluctuation zone in the Baoding Plain area

XU Buyun¹, YANG Huifeng^{1,2}, BAI Hua^{1,2}, SONG Bo^{1,2}, MENG Ruifang^{1,2}

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 2. Hebei Cangzhou Groundwater and Land Subsidence National Observation and Research Station, Shijiazhuang, Hebei 050061, China)

Abstract: Scientific determination of geological parameters of the groundwater level fluctuation zone is an important step for water resources evaluation and management. In the past 40 years, over-exploitation of groundwater in the Baoding Plain led to a serious deficit of aquifers, thus forming a huge deep vadose zone. After

收稿日期: 2022-08-16; 修订日期: 2022-10-24

投稿网址: www.swdvgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金地质联合基金项目(U2244214); 河北省创新能力提升计划高水平人才团队建设专项(225A4204D); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221752); 中国地质科学院科研业务费项目(SK202118)

第一作者: 徐步云(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事水文地质与水资源研究。E-mail: 463343225@qq.com

通讯作者: 杨会峰(1976-), 男, 博士, 研究员, 主要从事水循环研究与水资源区划。E-mail: yanghuifeng@mail.cgs.gov.cn

the South-to-North Water Diversion Project was put into operation, with the progress of ecological water supplement of rivers and lakes and groundwater limited-over-exploitation, the groundwater levels in some areas of the Baoding Plain stopped falling and rose. The quantitative relationship between the amount of water supplement and the change of groundwater levels has become an important scientific issue in the management of over-exploitation of groundwater. However, under the condition of groundwater level recovery, the calculation results will be deviated if the specific yield parameter of water release process is still used. Therefore, the free porosity parameter study of groundwater level recovery process is the key to solve this problem. Based on 67 engineering geological boreholes in the Baoding Plain, the comprehensive free porosity during groundwater level recovery is determined according to the lithologic characteristic parameters of the groundwater level fluctuation zone. The semi-variogram model is selected by the trend analysis and cross validation, and the spatial unknown points are interpolated by the Ordinary Kriging interpolation. The results show that (1) the best semi-variogram model of the comprehensive free porosity in the groundwater level fluctuation zone of the Baoding Plain is the 1 order index model. The spatial autocorrelation of the data is obvious, which is mainly affected by structural factors such as spatial location of the groundwater level fluctuation zone and stratigraphic type. (2) The comprehensive free porosity distribution shows that the southwest and northwest are the high value areas, and the extreme value can reach 0.25. The parameter gradually decreases to the central and eastern regions, and the minimum value is 0.02. (3) Compared with the value of the conventional specific yield, the value of the free porosity increases by about 0.03 in the north and south regions, which is about 1.2 times that of the conventional specific yield. In the central region, it is reduced by about 0.06, which is about half that of the conventional specific yield value. The research results are of important research value and great significance for ecological water supplement and water resources regulation in the benefited regions of the South-to-North Water Diversion Project.

Keywords: free porosity; specific yield; unsaturated zone; geostatistics; spatial variability; Baoding Plain area

自 20 世纪 70 年代以来,保定地区为保障农业供水,平原区大范围抗旱打井,地下水长期处于过度开发利用状态,导致地下水水位持续下降,部分含水层被疏干,形成规模巨大的厚包气带层^[1-3],引发一系列环境地质问题,成为制约当地可持续发展的瓶颈^[4]。自 2014 年底,南水北调工程正式向该地区供水,伴随河湖生态补水增加和地下水超采治理的推进,南水北调受水区保定平原的地下水水位出现不同程度的恢复^[5],水资源格局发生了显著变化^[6]。

在水位恢复背景下,回补水量和地下水水位变化的定量关系成为重要科学问题,确定区域上定量计算时所用参数成为研究的关键。通常在计算地层调蓄水量时并未严格区别地下水水位上升或下降所带来的土壤蓄水或释水过程,所用到的参数为给水度。给水度表示单位体积含水层释水能力的大小,而描述非饱和带地层单位体积储水能力大小的参数为自由孔隙率^[7-9]。在长期亏空的厚包气带地区,应用自由孔隙率计算的地层调蓄水量误差将会更小,从而得到的

回补水量和地下水水位的定量关系将更精确。关于空间分布的研究方法有地质统计学方法^[10-11]、多元统计分析^[12]、深度学习方法^[13]、模型模拟方法^[14]、分形方法^[15]等,其中以采用地质统计学与 GIS 相结合的方法为主。许多学者针对地层渗透系数^[16-18]、土壤饱和导水率^[19-20]、降水入渗系数^[21]等方面开展了较多的空间变异程度及分布规律研究,并取得了丰硕的成果,但对于反映地下空间调蓄能力的水文地质参数研究较少。在保定平原区域开展自由孔隙率的空间分布特征研究,对精确南水北调受水区变幅带调蓄潜力、管理生态补水与调控水资源具有重要研究价值和借鉴意义。

因此,文章选择保定平原区 67 个工程地质钻孔的采样资料,计算水位变幅带综合自由孔隙率,基于 ArcGIS 软件地统计模块,进行半变异函数模拟运算和 Kriging 插值分析,分析自由孔隙率空间变异程度及分布特征,探讨其与惯用给水度数值的差异及原因。

1 研究区概况

1.1 自然地理及水文地质概况

保定平原区北临京廊、西依太行、东临沧衡、南邻石家庄,总面积约 $1.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,属于山前倾斜平原,地势呈现为西北高东南低,地面坡降一般小于 2%。全区河流皆属海河流域的大清河水系,均源于太行山东麓,支流繁多,河短流急。河网呈扇形,以南、中、北 3 支水系汇入白洋淀(图 1)。区内含水层主要为第四系松散孔隙含水层,根据含水层与隔水层空间结构,将第四系含水系统分为 I ~ IV 含水组。其中 I、II 含水组之间水力联系密切,可视为统一含水系统,是研究区内农业用水的主要开采层,西部山前底界埋深 20 ~ 60 m,中部冲洪积平原底界埋深 120 ~ 160 m,东部冲湖积平原底界埋深 160 ~ 200 m。第 III、IV 含水组均属深层开采段,其中第 III 含水组是城镇生活和工业用水主要开采段,山前平原底界埋深 110 ~ 240 m,中部冲洪积平原底界埋深 240 ~ 300 m,东部冲湖积平原底界埋深 300 ~ 350 m。

1.2 地层岩性和结构

研究区共实施了 304 个工程地质钻孔,根据所揭露的地层类型按照 0 ~ <15 m、15 ~ <30 m、30 ~ 50 m 3 个层段分别编制地层岩性结构图(图 2)。保定平原区山前低山丘陵与山前平原交接地带,地层结构为黄土状土-基岩双层结构;在冲洪积扇区地层结构以卵石

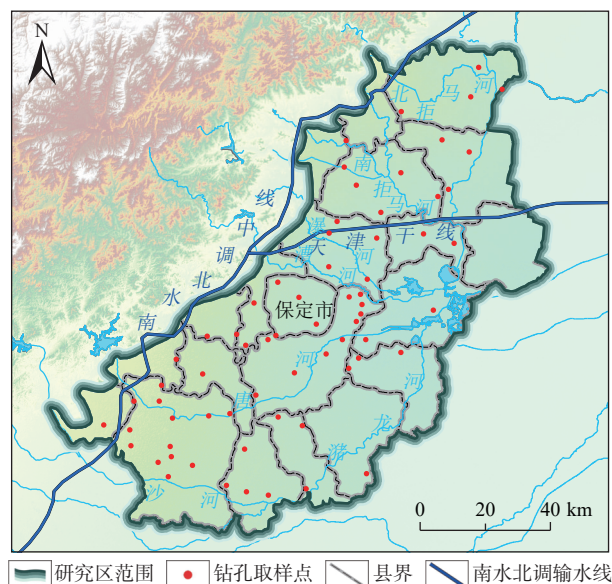


图 1 研究区位置及采样点分布

Fig. 1 Location of study area and distribution of the sampling points

单一结构为主,其中在保定平原南部大沙河冲洪积扇区,地层岩性结构以细砂单层结构为主;在现代河流及古河道区,地层结构类型以砂层单层结构、粉土-砂双层结构为主;古河道及现代河道河间带,地层结构类型以粉土-粉质黏土双层结构为主;在冲洪积扇间洼地及冲湖积平原区,岩土结构以粉质黏土单层结构为主。

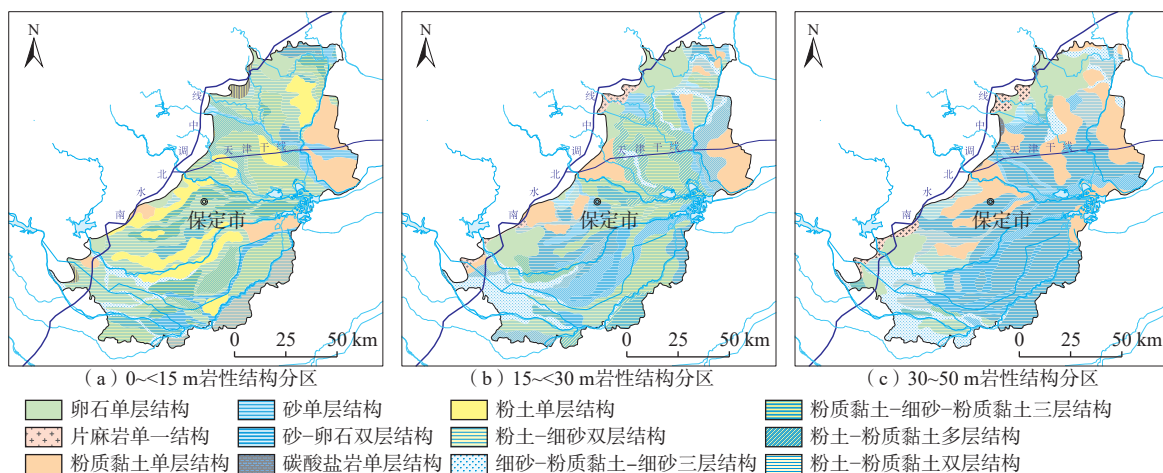


图 2 研究区地层岩性结构图

Fig. 2 Stratigraphic and lithologic structures of the study area

1.3 南水北调补水与水位恢复情况

保定平原区外调水工程包括南水北调工程和引黄入冀工程。据保定水资源公报,2021 年跨流域调水量 $7.560\,337 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中南水北调水向北易水—南拒马

河、唐河、北拒马河、瀑河、蒲阳河、曲逆河实施生态补水共计 $4.194\,2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在南水北调工程推进下,保定平原全区已成为南水北调受水区,外调水一定程度上置换了现有地下水开采,使保定平原局部地下水水

位止跌回升。

2 材料与方法

2.1 数据采集与测试

本文共选取 67 个工程地质钻探孔(图 1),采集原状岩心,点位分布覆盖研究区所有水文地质单元,共采集 622 个原状岩心样品,采集的原状岩心样品层位覆盖整个水位变幅带。为保证土样指标测量准确性,采集时在环刀样皮两端加装与样品截面等面积的不透水圆片,再浇灌蜡液,待蜡液凝固后盖紧保护帽并用胶带封口,样品采集后当天送往河北省地质实验测试中心进行土常规测试。含水率采用烘干法进行测试,比重采用比重瓶法测试,容重采用环刀法测试,孔隙度通过计算求得。

2.2 基于生态约束水位的水位变幅带划分

水位变幅带为现状水位至满足环境约束条件下的水位之间的包气带。变幅带综合自由孔隙率表征了水位间单位体积包气带的地层调蓄潜力^[22]。确定合理的水位恢复阈值关系到变幅带综合自由孔隙率计算的合理性。

将保定平原区浅层地下水现状水位埋深作为水位变幅带区间的下界面(图 3)。通过海河南系水文地质调查项目 2021 年 6 月水位统测数据绘制,统测密度达 6 点/100 km²。保定平原浅层地下水水位变幅带的上限界面采用该区域水位埋深恢复阈值(图 4)。该阈值基于不引起土壤盐渍化、有利于降水入渗补给及地下水调蓄、浅层地下水水位降落漏斗防控、城市地下

空间安全、地裂缝防控、维系湿地生物多样性等多要素耦合分析(表 1)^[23-25],建立保定平原区地下水水位恢复阈值指标体系。

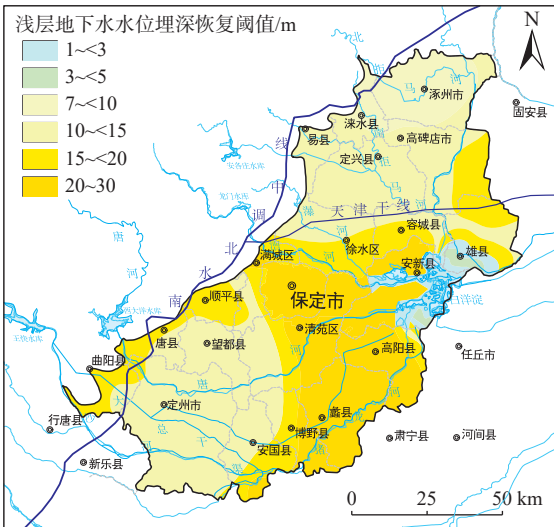


图 4 浅层地下水水位恢复阈值图(据文献[25]改)

Fig. 4 Recovery threshold of the shallow groundwater levels (modified from Ref. [25])

表 1 地下水水位恢复阈值指标体系

Table 1 Groundwater level recovery threshold index system

地下水层位	考虑要素	目标水位埋深
浅层	大规模开采对地下水水位影响	20世纪80年代水位埋深
	地下水水位降落漏斗区水位恢复	20世纪80年代水位埋深
	大中型城市地下空间利用安全性	20~30 m
	有利于降水入渗补给、地下水调蓄	10~15 m
	地裂缝防控	7~10 m
	盐渍化防控	3~4 m

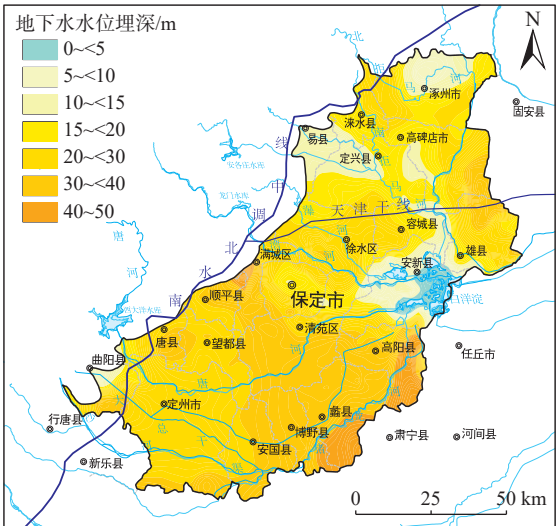


图 3 2021 年 6 月浅层地下水水位埋深图

Fig. 3 Buried depth of the shallow groundwater levels in June, 2021

研究区水位变幅带厚度在西南侧的望都—定州—安国地区为 10~20 m;在东南侧的高阳—蠡县—清苑地区厚度为 3~10 m;中部保定市区及周边水位埋深接近城区目标水位埋深上限,水位变幅带厚度为 1~5 m;北侧涿州—高碑店—雄县地区水位变幅带厚度为 5~15 m。

2.3 水位变幅带综合自由孔隙率

给水度和自由孔隙率是地下水资源评价和管理研究中的 2 个重要参数。给水度的定义是地下水水位下降单位深度时,因重力作用从单位水平面积岩土体释出的水体积^[26],是反映地层释水特性的参数,其数值主要受岩性及水位埋深的影响。自由孔隙率的定义为地下水水位上升单位高度需填充补给岩土体孔隙的水量^[7,9],是表征地层储水性能的重要指标,其数值除了受岩性影响,还与水位上升前变幅带岩土的

天然含水量大小有关。选用单位体积孔隙度与天然含水率差值的方法求取单一岩层的自由孔隙率^[7-9, 27], 该值可代表单位体积岩层中水位上升达饱和所需补充的水量。

对于整个变幅带来说, 其调蓄能力取决于各单层岩性储水能力和岩性组合特征, 本文用各岩层厚度作为权重, 将综合自由孔隙率定义为每个钻孔处各单一岩性自由孔隙率按厚度的加权平均值^[22]。由于工程地质钻孔未取得粗砂及以上粒径土层的原状样, 针对粗砂、卵砾石的单一岩性参数值, 采用 2019—2021 年于保定山前及中部平原开展的地下水资源评价中抽水试验获取的参数, 卵砾石自由孔隙率值取 0.250, 粗砂自由孔隙率值取 0.195。

2.4 数据处理与分析

通过 Excel 处理钻孔土常规数据, 计算各点的综合自由孔隙率数值, 利用 SPSS 软件对综合自由孔隙率进行基本统计特征分析、正态性检验。通过 ArcGIS 软件对数据进行空间趋势分析, 采用地质统计学方法构建适宜的半变异函数理论模型并进行交叉验证。通过经典统计学结合地质统计学开展变异性分析, 运用普通 Kriging 插值方法完成分布图绘制。

2.4.1 综合自由孔隙率计算

单一岩性自由孔隙率通过计算单位体积孔隙度与天然含水率差值的方法求取, 钻孔处的综合自由孔隙率为各岩层自由孔隙率按厚度的加权平均值:

$$\mu_i = n_i - \theta_i \tag{1}$$

$$\mu = \frac{\sum \mu_i h_i}{\sum h_i} \tag{2}$$

式中: μ_i ——各单一岩层自由孔隙率;
 μ ——综合自由孔隙率;
 n_i ——各岩层孔隙度;
 θ_i ——各岩层天然含水率;
 h_i ——各岩层厚度。

2.4.2 数据转换

地质统计学中半变异函数的成立必须满足二阶平稳假设, 这要求样点计算值必须满足正态分布^[28], 否则可能存在比例效应^[29]。本文中综合自由孔隙率既不满足正态分布, 也不满足对数正态分布, 为了提高样本正态性, 引入 Box-Cox 变换:

$$y^{(\lambda)} = \begin{cases} \frac{y^{\lambda} - 1}{\lambda}, & \lambda \neq 0 \\ \ln y, & \lambda = 0 \end{cases} \tag{3}$$

式中: y ——样本值;
 λ ——待定参数, 一般采用最大似然估计求得。

2.4.3 经典统计学空间变异分析理论

综合自由孔隙率的空间变异程度用变异系数 C_v 表示:

$$C_v = s / \bar{x} \tag{4}$$

式中: s ——标准差;
 $\bar{x}$ ——平均值。

一般可将样本测定结果变异程度分为 3 级: $C_v < 10\%$ 为弱变异性, $10\% \leq C_v \leq 100\%$ 为中等变异性, $C_v > 100\%$ 为强变异性^[30]。

2.4.4 地质统计学空间变异分析理论

地质统计学空间变异理论的核心是半变异函数, 半变异函数表示的是数据与数据点间距之间的关系^[31], 其计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2 \tag{5}$$

式中: $\gamma(h)$ ——半变异函数值;
 $Z(x_i)$ ——随机变量 Z 在 x_i 处的值;
 $Z(x_i + h)$ ——距点 x_i 距离为 h 处点的值;
 $N(h)$ ——滞后距离为 h 时的样本对数。

在实际应用时, 通常对半变异函数进行线性组合, 得到变异函数模型, 通过变异函数模型估计空间未知点的属性值^[32]。常用的变异函数拟合模型有球状模型、指数模型和高斯模型, 其表达式见表 2。

表 2 变异函数理论模型				
Table 2 Theoretical models of the variation function				
模型	公式	变程	块金值	基台值
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	C_0	$C_0 + C$
指数模型	$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ C_0 + C \left(1 - e^{-\frac{h}{a}} \right), & h > 0 \end{cases}$	$3a$	C_0	$C_0 + C$
高斯模型	$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ C_0 + C \left(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}} \right), & h > 0 \end{cases}$	$\sqrt{3}a$	C_0	$C_0 + C$

其中 C_0 指样点间距很小时两点间品位的变化, 它是由测量误差或自然因素空间变异导致的, 表示随机变异的大小。 $C_0 + C$ 是指随距离的增大, 变异函数从初始的块金值增大到一个相对稳定的常数, 反映了区域化变量在空间范围内变异的强度。变程是变异函数达到基台值时的样本间距, 表征空间数据的自相关距离大小。块金效应是块金值与基台值的比值, 反映

空间变异程度。当 $C_0/(C_0+C) \leq 25\%$ 时,具有较强的空间相关性, $25\% < C_0/(C_0+C) < 75\%$ 时为中等空间相关性, $C_0/(C_0+C) \geq 75\%$ 时为弱空间相关性^[33]。

3 结果

3.1 综合自由孔隙率统计特征

运用传统统计方法,对研究区水位变幅带综合自由孔隙率进行一般描述性统计和正态分布检验,结果分别见表 3、表 4 与图 5。

研究区内综合自由孔隙率的变异系数为 53.7%,属于中等变异。原始自由孔隙率数据和经对数转换后的数据其峰度和偏度虽然都接近于 0,但在频率直方图中分布曲线效果并非很好,从 Q-Q 图(正态概率图)也看出正态概率分布稳定性一般,表现在样本点在斜率为标准差、截距为均值的直线上比较分散。通过 K-S 检验(Kolmogorov-Smirnov test)和 S-W 检验(Shapiro-Wilk test)进行正态分布检验(表 4),可知综合自由孔隙率不符合正态分布,通过对数转换后的数

表 3 综合自由孔隙率统计特征表

Table 3 Statistical characteristics of the comprehensive free porosity

数据	中值	平均值	标准差	变异系数	偏度	峰度	偏度标准误差	峰度标准误差	偏度Z评分	峰度Z评分
μ	0.090	0.101	0.054	53.7	0.606 6	-0.163 8	0.293	0.578	2.071	-0.283
$\ln\mu$	-2.408	-2.456	0.628	-25.6	-0.710 3	0.133 1	0.293	0.578	-2.426	0.230
Box-Cox	-1.400	-1.387	0.175	-12.6	0.002 5	-0.507 8	0.293	0.578	-0.008	-0.879

注: Box-Cox变换中 $\lambda=0.50$ 。

表 4 综合自由孔隙率正态性检验结果

Table 4 Normality test results of the comprehensive free porosity

数据	K-S检验			S-W检验		
	统计	样本	Sig	统计	样本	Sig
μ	0.110	67	0.043	0.956	67	0.018
$\ln\mu$	0.081	67	0.200	0.949	67	0.008
Box-Cox	0.060	67	0.200	0.981	67	0.418

据符合正态分布。但对数转换后的峰度和偏度的 Z 评分未在 ± 1.96 之间,可认为数据对数转换后在 $\alpha=0.05$ 的检验水平下不满足正态分布要求。

为了提高样本正态性,将自由孔隙率进行 Box-Cox 变换,在 $\lambda=0.50$ 变换下,频率直方图中分布曲线效果很好, Q-Q 图中样点沿直线紧密排布, K-S 检验与 Z 评分方法均显示 Box-Cox 变换后数据服从正态分

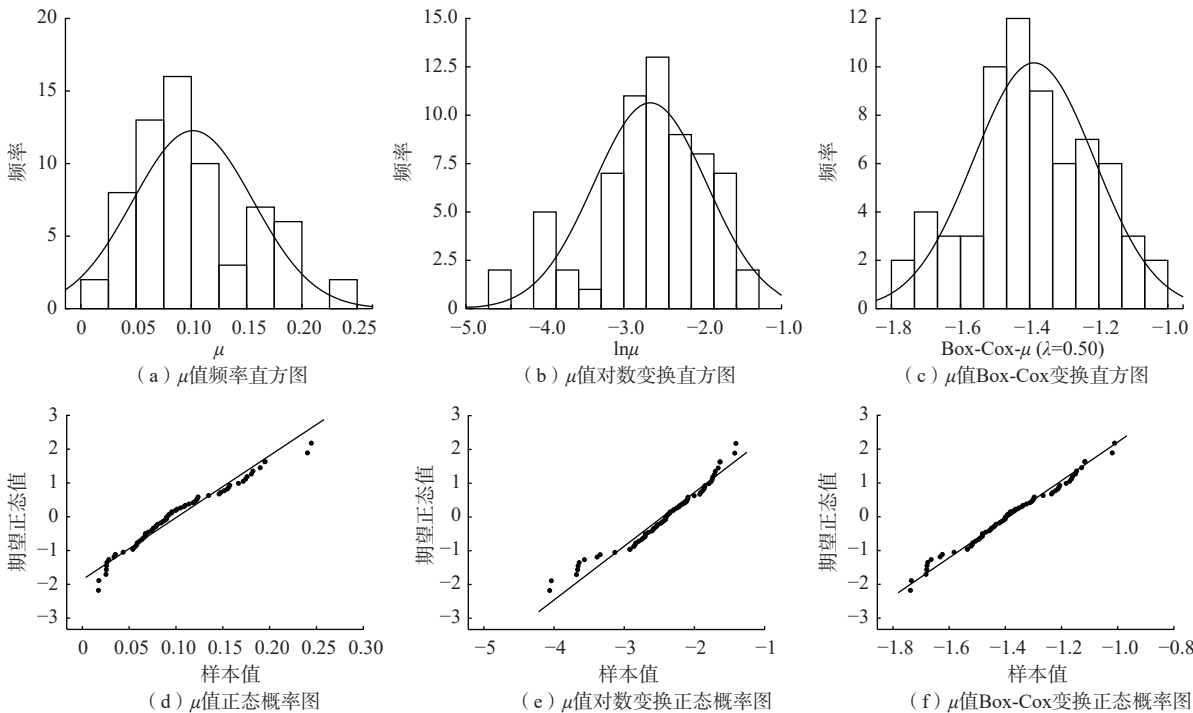


图 5 综合自由孔隙率直方图与 Q-Q 图

Fig. 5 Histograms and Q-Q plots of the comprehensive free porosity

布,符合地质统计学分析的条件。

3.2 趋势分析和插值模型选择

空间趋势效应反映空间变量全局变化趋势,一般用零阶、一阶、二阶多项式描述空间趋势效应。零阶表示没有趋势效应,一阶表示区域化变量沿着一定方向呈直线变化,二阶表示区域化变量沿一定方向呈多项式变化。受单层岩性蓄水能力和地层岩性组合特征的影响,区域非饱和带综合自由孔隙率常呈现一定的特征趋势,在空间插值分析中不可忽视。

运用 ArcGIS 软件中地统计分析模块对研究区水位变幅带综合自由孔隙率进行趋势效应分析(图 6)。图中 X 轴表示正东方向, Y 轴表示正北方向, Z 轴表示各点综合自由孔隙率大小,左后投影面中绿色曲线表示东-西向的全局性趋势效应变化,右后投影面中蓝色曲线表示南-北向全局性趋势变化。可以看出,投影线在两个方向上均呈“U”字形,表现出一定的二阶趋势。

在考虑各向异性的情况下,通过交叉验证方法^[34],分别选择零阶趋势、一阶趋势和二阶趋势效应,以各插值模型交叉验证误差最小为原则,选择最合适的变异函数模型。交叉验证中每次移除 1 个数据位置,然后利用其余数据预测该位置的数据值,并与实际值进

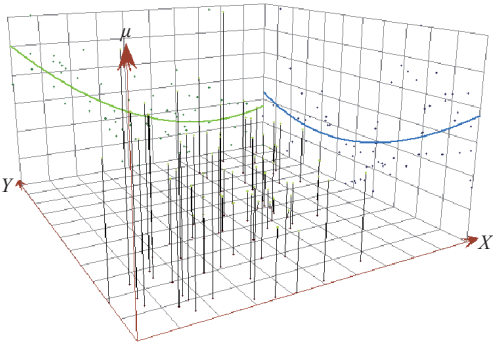


图 6 水位变幅带综合自由孔隙率趋势效应图
Fig. 6 Trend effect diagram of the comprehensive free porosity in the groundwater level fluctuation zone

行比较,最终完成所有位置实际值和预测值的比较。判断模拟结果好坏的标准为:平均误差(ME)趋近于 0,均方根误差(RMSE)最小,平均标准误差(ASE)最小且趋近于 RMSE,平均标准差(MSE)趋近于 0,标准化均方根误差(RMSSE)趋近于 1。由表 5 可知,虽然零阶和二阶趋势方法 ME 和 MSE 较小,但一阶指数模型中 ASE 与 RMSE 差值十分接近且 RMSE 为各项最小,同时 RMSSE 非常接近于 1,ME 于 MSE 也满足趋近于 0 的条件,综合以上考虑,一阶指数模型为 Kriging 插值时精度最高的半变异函数模型。

表 5 不同趋势阶数插值误差比较

Table 5 Comparison of interpolation errors of different trend orders

趋势	模型	预测误差				
阶数	类型	平均误差	均方根误差	平均标准误差	标准化均方根误差	平均标准误差
0	球状	-0.000 45	0.034 5	-0.023 1	1.075 3	0.033 3
	指数	-0.001 64	0.034 8	-0.049 7	0.987 1	0.036 8
	高斯	-0.000 31	0.035 1	-0.025 4	1.167 6	0.030 9
1	球状	-0.001 13	0.034 9	-0.047 9	1.116 0	0.032 2
	指数	-0.001 12	0.034 5	-0.042 5	1.009 3	0.035 5
	高斯	-0.001 26	0.035 2	-0.048 1	1.115 2	0.032 0
2	球状	0.000 63	0.034 9	-0.010 6	1.084 2	0.033 2
	指数	0.000 50	0.035 4	-0.017 5	1.040 2	0.034 7
	高斯	0.000 40	0.034 7	-0.016 9	1.087 4	0.032 8

3.3 半变异函数分析及综合自由孔隙率空间分布特征

利用地质统计学半变异理论对地下水水位变幅带综合自由孔隙率的空间变异性进行分析,考虑各向异性和一阶趋势效应,采用指数模型进行拟合,结果见表 6。

研究区综合自由孔隙率块金值较小,表明受随机因素引起的变异性很小。块金效应小于 25%,说明具有较强的空间相关性。其空间变异主要由变幅带空间位置、地层类型等结构性因素引起。变程衡量了变量在多远距离内存在空间自相关性,当采样点间距大

于变程时,说明区域化变量不再具有相关性,本研究实际采样间距小于变程,表明研究数据能较准确地反映综合自由孔隙率的空间变异特征^[35]。

在趋势分析及半变异函数理论模型的基础上,进行普通 Kriging 插值,绘制出综合自由孔隙率空间分布图(图 7)。

插值结果分析表明,综合自由孔隙率的极大值出现在西部唐县、曲阳县山前一带以及北部涞水县山前地区,可达 0.25,向保定市方向呈递减趋势,极小值出现在保定市城区东西两侧和高碑店、涿州市东侧,

表 6 半变异函数类型及模型参数

Table 6 Types of the semi-variation function and model parameters

模型类型	趋势效应	变程/m		各向异性系数	块金值	基台值	块金效应/%
		长轴	短轴				
指数模型	一阶	24 936.15	21 944.23	1.14	0.000 1	0.016 6	0.60

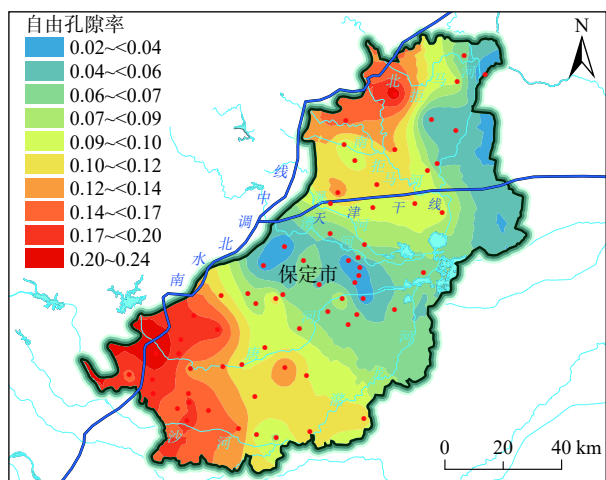


图 7 地下水水位变幅带综合自由孔隙率空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of the comprehensive free porosity in the groundwater level fluctuation zone

为 0.02 左右。综合自由孔隙率在区域上整体表现为西南、西北高,向中部及东部逐步降低的趋势。

其主要原因为研究区水位变幅带地层主要为第四系全新统及晚更新统地层。保定平原西南、西北部山前地区地层沉积相类型为冲洪积相,地层综合岩性为卵砾石、砂砾石夹薄层亚黏土、亚砂土结构,储水性强,形成综合自由孔隙率的高值区;沉积相类型向中部方向逐步变化为冲(洪)积-湖相、冲洪积相、浅水湖相沉积,地层综合岩性逐渐变化为厚层粗砂-中粗砂夹亚砂土、中砂-细砂夹亚砂土多层结构、中厚层粉质黏土与细砂-粉土互层结构,储水性能逐步降低,综合自由孔隙率由高值过渡至低值。保定平原中部山前地区沉积相类型以冲(洪)积-湖相为主,局部河道附近为冲洪积相,地层综合岩性以粉质黏土-粉土互层为主,河道附近存在粉质黏土-细砂多层结构,向东过渡为湖相、浅水湖相,地层沉积物进一步变细,主要为中厚层粉质黏土与细砂-粉土互层,同时该区域水位埋深接近恢复阈值,变幅带厚度较小,多以土层为主,缺少储水性强的砂层,因此保定市区东西侧地区变幅带整体储水性较差,局部地区综合自由孔隙率极小。综合自由孔隙率的空间分布与当地岩性结构分区具有较好的一致性。

基于保定平原水位变幅带综合自由孔隙率的分布规律及地下水水位变幅区间大小,在生态补水工程

中可针对不同调蓄潜力地区开展针对性地下水回补,将定州、涿州—涿水地区作为地下水重点调蓄区,以解决区域性地下水超采问题,进一步修复地下水水位降落漏斗问题。

4 讨论

在地下水资源规划与管理中,表征岩土调蓄性能的水文地质参数尤为重要。前人将岩土中水位变化单位高度所储存和释放的水量分别称为自由孔隙率和给水度^[8],并通过试验证明了二者存在一定差异^[7,9]。通常地下水水位上升时需填充的孔隙比释水时所疏干的孔隙大,因此一般而言自由孔隙率大于给水度^[7-9,27],尤其在厚包气带地区,两个过程参数差异更为明显。

在保定平原以往区域水资源评价与管理中,区域尺度的给水度数据多参考《华北平原地下水可持续利用图集》(图 8)。该套数据是通过非稳定流抽水试验获取的水位下降排水过程的给水度,其参数值与图 7 补水条件下水位回升过程的自由孔隙率值对比可以发现:保定平原西南地区自由孔隙率值比给水度值大 0.03 左右,约是该区域惯用给水度值的 1.25 倍。两参数值均呈现向东北方向降低趋势,自由孔隙率值在山前部分地区与给水度值差异更为明显。一方面因为给水度是通过 1~2 d 的抽水试验获取,在短时间的抽水条件下,地层孔隙中的少部分重力水未完全释出,同时由于地层的非均质性,会有少部分毛细水滞后释水^[26],导致所求给水度值比理想条件下给水度值偏小。另一方面由于该区包气带长期亏空,水位变幅带内的土壤水分随时间逐步向深部运移^[37],导致变幅带内土壤天然含水率逐渐降低,通过孔隙度与天然含水率差值计算的自由孔隙率值将有所偏大。因此该地区的自由孔隙率值略大于给水度值。

保定平原中部地区水位上升与下降条件下参数值差异较大,自由孔隙率值比给水度值约小 0.06,约是该区域惯用给水度值的一半。原因为保定平原中部地区位于冲洪积扇间洼地,通过整理工程地质钻孔资料,该区域水位变幅带地层沉积结构以粉质黏土-粉土结构为主,而抽水试验主要针对含水砂层展开,相比考虑了土层物理特征的自由孔隙率,在水位变

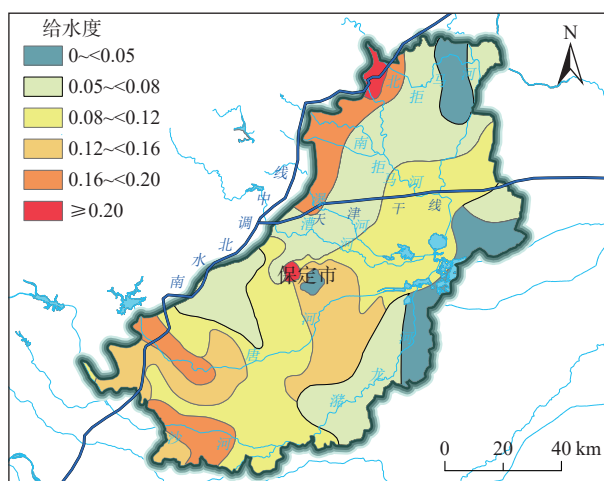


图 8 浅层地下水给水度分布图 (据文献 [36] 改)

Fig. 8 Specific yield distribution of the shallow groundwater (modified from Ref. [36])

幅带区间内土层较厚地区给水度将略大于自由孔隙率值。

在保定平原北部地区,自由孔隙率值比给水度值约大 0.02,约是该区域惯用给水度值的 1.2 倍。其原因与保定西南部地区相同。该地区的自由孔隙率数值由西向东方向逐渐减小,与图 8 中该区域给水度变化一致,但是自由孔隙率数值在东南方向变化表现为逐渐减小,与给水度值在该方向先减小后增加再减小的变化有所差异,是由于《华北平原地下水可持续利用图集》在 2000 年初编制,当时保定平原北部的水位埋深较浅,其给水度的划分参考了第四纪全新世的地质略图,在东南方向上随该区全新统冲洪积相-冲积相-湖相-冲洪积相-浅水湖相的沉积相变化,形成了给水度值由高值先降后升再降低的变化趋势,而如今由于保定平原地下水水位埋深增大,图 7 中所求的综合自由孔隙率值受第四系全新统与晚更新统地层综合叠加影响,形成了数值由山前向中部递减的趋势。

整体而言,保定平原区中 2 个过程参数值在空间分布上差异明显。而在目前的生产实践中,常将给水度替代自由孔隙率进行水资源评价研究,导致研究结果产生一定偏差。因此本文通过布设工程地质钻孔并取样分析求得的自由孔隙率将更符合长期亏空的厚包气带地区水位恢复背景下的调蓄量计算。

5 结论

(1)统计分析显示保定平原水位变幅带地层综合自由孔隙率的变异系数为 53.7%,属于中等变异。数据经 Box-Cox 转换后服从正态分布,满足地质统计学分析条件。

(2)全局趋势分析及结果交叉验证显示,去除空间一阶趋势的地层综合自由孔隙率指数模型模拟结果最优,验证精度较高。长轴变程 24.9 km,短轴变程 21.9 km,块金效应在 25% 以下,表现出强烈空间自相关性,受变幅带空间位置、地层类型等结构性因素影响较大。

(3)水位恢复背景下的保定平原地下水水位变幅带综合自由孔隙率分布整体表现为西南、西北高,极值可达 0.25,数值向中部及东部逐步降低,最小降至 0.02。主要与冲洪积扇分布和沉积地层的单层岩性给水能力及地层岩性组合特征有关,其空间分布与当地岩性结构分区具有良好的一致性。其中定州地区、涿州-涞水地区具有很大的地下水调蓄潜力。

(4)保定地区自由孔隙率值与惯用给水度值差异明显。其南部与北部综合自由孔隙率值略大于给水度值约 0.03,是惯用给水度值的 1.2 倍左右,在冲洪积扇顶局部地区表现明显。而在中部扇间洼地及河间带部分地区,综合自由孔隙率值比惯用给水度值小约 0.06,为惯用给水度值的 1/2 左右。水位恢复过程的综合自由孔隙率用于地下水超采治理背景下的回补效果评价更为科学合理。

参考文献 (References) :

- [1] 李文鹏,王龙凤,杨会峰,等.华北平原地下水超采状况与治理对策建议[J].中国水利,2020(13):26-30. [LI Wenpeng, WANG Longfeng, YANG Huifeng, et al. The groundwater over exploitation status and counter measure suggestions of the North China Plain[J]. China Water Resources, 2020(13): 26-30. (in Chinese with English abstract)]
- [2] SHI J S, WANG Z, ZHANG Z J, et al. Assessment of deep groundwater over-exploitation in the North China Plain[J]. Geoscience Frontiers, 2011, 2(4): 593-598.
- [3] SU G L, WU Y Q, ZHAN W, et al. Spatio temporal evolution characteristics of land subsidence caused by groundwater depletion in the North China plain during the past six decades[J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126678.
- [4] 曹文庚,杨会峰,高媛媛,等.南水北调中线受水区保定平原地下水质量演变预测研究[J].水利学报,2020,51(8):924-935. [CAO Wengeng, YANG Huifeng, GAO Yuanyuan, et al. Prediction of groundwater quality evolution in the Baoding Plain of the SNWDP benefited regions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(8): 924-935. (in Chinese with English abstract)]

- [5] ZHANG C, DUAN Q Y, YE P J-F, et al. Sub-regional groundwater storage recovery in North China Plain after the South-to-North water diversion project[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 126156.
- [6] 杨会峰, 曹文庚, 支传顺, 等. 近40年来华北平原地下水位演变研究及其超采治理建议[J]. *中国地质*, 2021, 48(4): 1142 – 1155. [YANG Huifeng, CAO Wengeng, ZHI Chuanshun, et al. Evolution of groundwater level in the North China Plain in the past 40 years and suggestions on groundwater over exploitation treatment[J]. *Geology in China*, 2021, 48(4): 1142 – 1155. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 裴源生. 地下水水位匀速升降条件下土壤水分运动和给水度的研究[J]. *水文地质工程地质*, 1983(4): 1 – 7. [PEI Yansheng. Study on soil water movement and specific yield under the condition of uniform rise and fall of groundwater level[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1983(4): 1 – 7. (in Chinese)]
- [8] 张蔚榛, 张瑜芳. 土壤的给水度和自由孔隙率[J]. *灌溉排水*, 1983(2): 1 – 16+47. [ZHANG Weizhen, ZHANG Yufang. Specific yield and free porosity of soil[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1983(2): 1 – 16+47. (in Chinese)]
- [9] 蔡树英. 土壤储水过程及自由孔隙率的初步研究[J]. *武汉水利电力学院学报*, 1988(2): 104 – 108. [CAI Shuying. A study of the water storage procedure and free porosity of soil[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 1988(2): 104 – 108. (in Chinese with English abstract)]
- [10] XUE P P, WEN Z, ZHAO D J, et al. Determination of hydraulic conductivity and its spatial variability in the Jiangnan Plain using a multi-format, multi-method approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 594: 125917.
- [11] CHERIF K, YAMINA B, BILAL B, et al. Delineation of groundwater potential zones in Wadi Saida Watershed of NW-Algeria using remote sensing, geographic information system-based AHP techniques and geostatistical analysis[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2021, 9(1): 45 – 64.
- [12] MEHDI B, ELMIRA K, ELAHE K. Spatial variation assessment of groundwater quality using multivariate statistical analysis (Case Study: Fasa Plain, Iran)[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2020, 8(3): 230 – 243.
- [13] 高瑞忠, 朝伦巴根, 贾德彬, 等. 神经网络模型在根系带土壤水力特征参数空间变异性研究中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2004(4): 13 – 16. [GAO Ruizhong, CHAO Lunbagen, JIA Debin, et al. Research on the spatial variance of the soil hydraulic parameters based on the artificial neural network[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2004(4): 13 – 16. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 董勤各, 许迪, 章少辉, 等. 考虑灌溉参数空间变异的区域畦灌模拟与验证[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(9): 1 – 9. [DONG Qinge, XU Di, ZHANG Shaohui, et al. Simulation and validation for regional border irrigation considering spatial variability of irrigation parameters[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(9): 1 – 9. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 方萍, 吕成文, 朱艾莉. 分形方法在土壤特性空间变异研究中的应用[J]. *土壤*, 2011, 43(5): 710 – 713. [FANG Ping, LV Chengwen, ZHU Aili. Applied studies of fractal theory on spatial variability of soil properties: A review[J]. *Soils*, 2011, 43(5): 710 – 713. (in Chinese with English abstract)]
- [16] WANG T, LIU Y Q, WANG J Z, et al. Assessment of spatial variability of hydraulic conductivity of seasonally frozen ground in Northeast China[J]. *Engineering Geology*, 2020, 274: 105741.
- [17] 宋浩, 张琛, 刘明, 等. 基于地统计学的伊犁-巩乃斯河谷渗透系数空间变异性研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(1): 97 – 103. [SONG Hao, ZHANG Chen, LIU Ming, et al. The spatial variability of hydraulic conductivity based on geostatistics in Ili-Kunes valley[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(1): 97 – 103. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 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)]
- [19] WANG W, WANG Y, SUN Q M, et al. Spatial variation of saturated hydraulic conductivity of a loess slope in the South Jingyang Plateau, China[J]. *Engineering Geology*, 2018, 236: 70 – 78.
- [20] FU T G, CHEN H S, ZHANG W, et al. Spatial variability of surface soil saturated hydraulic conductivity in a small karst catchment of southwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(3): 2381 – 2391.
- [21] 刘泓志, 肖长来, 张岩祥, 等. 基于地统计学的降水入渗补给系数的空间变异特征分析[J]. *节水灌溉*, 2014(6): 54 – 56. [LIU Hongzhi, XIAO Changlai, ZHANG

- Yanxing, et al. Spatial variation characteristics analysis of precipitation infiltration recharge coefficient based on geostatistics[J]. *Water Saving Irrigation*, 2014(6): 54 – 56. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 钱永. 开采条件下华北平原浅层地下水系统演变研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2007. [QIAN Yong. Research on evolvement of shallow groundwater system impacted by exploiting in North China Plain[D]. Beijing: China Academy of Geological Sciences, 2007. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 靳博文, 王文科, 段磊, 等. 保定平原区地下水生态水位阈值的探讨[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 166 – 175. [JIN Bowen, WANG Wenke, DUAN Lei, et al. Discussion on ecological water level threshold of groundwater in Baoding Plain area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 166 – 175. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 刘鹏飞, 张光辉, 崔尚进, 等. 旱区湿地周边盐渍化农田生态水位阈值与“水位-水量”双控技术[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 42 – 51. [LIU Pengfei, ZHANG Guanghui, CUI Shangjin, et al. Threshold value of ecological water table and dual control technology of the water table and its quantity in the salinized farmland around wetland in arid areas[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 42 – 51. (in Chinese with English abstract)]
- [25] YANG H F, MENG R F, BAO X L, et al. Assessment of water level threshold for groundwater restoration and over-exploitation remediation the Beijing-Tianjin-Hebei Plain[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2022, 10(2): 113 – 127.
- [26] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2011. [ZHANG Renquan, LIANG Xing, JIN Menggui, et al. Fundamentals of hydrogeology [M]. Beijing: Geological publishing house, 2011. (in Chinese)]
- [27] 陈南祥. 给水度与饱和差关系的初步研究[J]. 河海大学学报, 1998(4): 112 – 115. [CHEN Nanxiang. Study on the relation between specific yield and saturation deficiency[J]. *Journal of Hohai University*, 1998(4): 112 – 115. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005. [ZHANG Renduo. Spatial variation theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)]
- [29] 赵鑫, 王存国, 魏永霞. 坡耕地主要土壤参数的空间变异特征[J]. *中国农村水利水电*, 2014(1): 11 – 14. [ZHAO Xin, WANG Cunguo, WEI Yongxia. Spatial statistic properties of soil parameters at slope[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(1): 11 – 14. (in Chinese with English abstract)]
- [30] VIEIRA S R, DECASTRO O M, TOPP G C. Spatial variability of some soil physical properties in three soils of Sao-Paulo, Brazil[J]. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 1992, 27,(2): 333 – 341.
- [31] 顾晓敏, 崔亚莉, 肖勇, 等. 昌平区山前平原地下水位空间变异性特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(2): 10 – 15. [GU Xiaomin, CUI Yali, XIAO Yong, et al. Spatial variability of groundwater levels of piedmont in the Changping District[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(2): 10 – 15. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 张经泾, 魏传江, 申晓晶, 等. 基于GIS的吉林市区地下水埋深空间异质性分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(2): 97 – 103. [ZHANG Jingjing, WEI Chuanjiang, SHEN Xiaojing, et al. Spatial variability of groundwater depth based on GIS in Jilin Urban Area[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(2): 97 – 103. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 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.
- [34] JONES D R. A taxonomy of global optimization methods based on response surfaces[J]. *Journal of Global Optimization*, 2001, 21(4): 345 – 383.
- [35] 张涛, 吴剑锋, 林锦, 等. 变异函数模型对渗透系数克里格插值的影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 1 – 7. [ZHANG Tao, WU Jianfeng, LIN Jin, et al. A comparative study of the ordinary kriging applied to hydraulic conductivity interpolation based on different variogram models[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(4): 1 – 7. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 张兆吉, 费宇红. 华北平原地下水可持续利用图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2009, 72 – 72. [ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong. Atlas of groundwater sustainable utilization in North China Plain[M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 2009, 72 – 72. (in Chinese)]
- [37] 林丹. 包气带变化及其对地下水补给的影响[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014. [LIN Dan. The change of vadose zone and its impact on groundwater recharge[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese with English abstract)]