

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdaq.2020.0131

袁颖,张天亮,张超,等.华北平原山前至滨海区垂向渗透系数空间变异性[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):184-190. YUAN Y,ZHANG T L,ZHANG C,et al. Spatial variability of vertical permeability coefficient from the piedmont to the coastal area of North China Plain[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(6):184-190. (in Chinese)

# 华北平原山前至滨海区垂向渗透系数空间变异性

袁颖<sup>1,2</sup>,张天亮<sup>1</sup>,张超<sup>1</sup>,马荣<sup>3</sup>

(1. 河北地质大学 城市地质与工程学院, 石家庄 050031; 2. 河北省高校生态环境地质应用技术研发中心, 石家庄 050031; 3. 中国地质科学院 水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

**摘要:**以华北平原山前至滨海区为研究区,选择8个钻孔,利用渗透系数反演公式和改进的 Archie 公式对渗透系数进行计算,同时充分考虑研究区垂向渗透系数影响因素,基于随机森林算法和时间序列算法对垂向渗透系数的空间变异性进行研究。研究表明:渗透系数在垂向上的影响因素主要为沉积环境、地层压力、随机误差三大类;在剔除沉积环境和随机误差的影响后,渗透系数随深度的增加而不断减小,山前至滨海区渗透系数对地层压力的敏感性呈逐渐递减的趋势。研究结果可为华北平原农业灌溉、污染物迁移、垃圾填埋场选址及深层地下水资源开发等提供科学依据。

**关键词:**垂向渗透系数;空间变异性;随机森林算法;时间序列算法

中图分类号:P641 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



## Spatial variability of vertical permeability coefficient from the piedmont to the coastal area of North China Plain

YUAN Ying<sup>1,2</sup>, ZHANG Tianliang<sup>1</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>, MA Rong<sup>3</sup>

(1. School of Urban Geology and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 2. Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Shijiazhuang 050031, China; 3. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China)

**Abstract:** The permeability coefficient is the main parameter to characterize permeability, and has strong spatial variability. Taking the piedmont coastal area of North China Plain as the study area, eight boreholes were selected, and the permeability coefficient is calculated by the inversion formula and the improved Archie formula. The spatial variability of vertical permeability coefficient is studied using time series method and random forests algorithm based on fully considering the influencing factors of vertical permeability coefficient in the study area. The result showed that the influencing factors of the vertical permeability coefficient could be divided into three categories: sedimentary environment, formation pressure, and random error; after removing the influence of sedimentary environment and random error, the permeability coefficient decreased with the increase of depth, and the sensitivity of the permeability coefficient to the formation pressure decreased gradually from the piedmont to the coastal area. A scientific basis was provided for understanding agricultural irrigation, pollutant migration, site selection of landfill sites, and development of deep groundwater resources in North China Plain.

**Key words:** vertical permeability coefficient; spatial variability; random forest algorithm; time series method

收稿日期:2020-02-19 修回日期:2020-09-17 网络出版时间:2020-09-29

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200929.0900.002.html

基金项目:国家自然科学基金(41807231);河北省教育厅重点资助项目(ZD2016038)

作者简介:袁颖(1976—),男,江西景德镇人,教授,博士,主要从事环境和灾害地质、工程地质的教学和科研工作。E-mail:yuanyingson@163.com

通信作者:张天亮(1995—),男,河北新乐人,主要从事环境和灾害地质研究。E-mail:1090278161@qq.com

渗透系数作为含水介质中最重要水文地质参数,研究其在垂向上随深度的空间变异性,有助于理清地表水与地下水之间的溶质运移规律及影响因素,从而为生态环境的治理提供科学依据。Louis<sup>[1]</sup>早在1974年提出渗透系数以指数或对数形式随深度不断衰减,这一理论在水文地质领域得到广泛应用,并在专业水文地质软件MODFLOW2000中建立了相应的算法模块<sup>[2]</sup>。在此基础上,研究人员<sup>[3-12]</sup>不断对渗透系数的模型进行修改、完善,从横向、纵向、渗透系数的变化等方面进行研究,并建立大量数学模型来对渗透系数在垂向上的空间变异性进行表征。目前,对渗透系数与深度的相关性研究仍在进一步的探讨中<sup>[13]</sup>。特别是在不同沉积环境和地层压力下,渗透系数的空间变异性研究始终受到广大学者的关注。

随机森林算法被定义为机器学习中的一种方法,它主要是运用模拟以及迭代的方法建立在分类树上的一种算法。其主要优点是较之前的预测方法而言预测精度有很大提高且计算量没有显著增加<sup>[14]</sup>。时间序列算法属于统计学中的一种动态预测方法,是按照时间的先后顺序根据某一个指标记录某一现象相关数据的一种预测方法,且这些数据本身都存在着某种关系,在受到某种因素影响时,这些数据中的任何一个都会表现出某种随机性<sup>[15-16]</sup>。

以地层沉积物粒度数据为基础,在提取传统粒度特征参数的基础上,引入随机森林算法,进一步提取多项粒度分布特征因子,然后对这些因子做垂向上的循环周期,以此循环周期作为构建渗透系数时间序列的时间因子。随后采用时间序列算法,将沉积环境、地层压力、随机误差作为时间序列的三大部分,在剔除沉积环境和随机误差的影响后,研究华北平原山前至滨海区渗透系数与深度的空间变化规律。

## 1 随机森林算法和时间序列算法

### 1.1 随机森林算法

随机森林与其他模型一样,假设其中因变量 $Y$ 的观测值有 $n$ 个,并且与之相关的自变量 $A$ 有 $m$ 个,随机森林都可以解释多个变量( $A_1, A_2, A_3, \dots, A_m$ )对因变量 $Y$ 的作用<sup>[17]</sup>。利用Bootstrap重新抽样方法给随机森林在构建分类树时,在原始数据中随机抽取 $n$ 个观测值<sup>[18]</sup>,且在这 $n$ 个观测值中有的数可被多次选择,有的数有可能一次都没有被选中。

与此同时利用随机森林选择 $m$ 个自变量中的部分变量,确定分类树节点,这样每次构建的分类树都可能不相同。算法步骤概括如下:

(1)对数据库中的样本进行有放回抽样,将抽取的数据样本的子集训练为一个基分类。

(2)重复步骤(1) $n$ 次即得到 $n$ 个基分类器,这样就得到了1个基分类器集合。

设数据库为 $Y$ ,那么抽样得到的子训练集则为 $Y' = \{Y'_1, Y'_2, \dots, Y'_n\}$ ,基分类集合为 $C = \{C'_1, C'_2, \dots, C'_n\}$ 。每次构建的分类树都可能不一样。在一般情况下,随机森林随机地生成几百个至几千个分类树,然后选择重复程度最高的树作为最终结果。

### 1.2 时间序列算法

时间序列主要分为长期趋势项、季节项和随机项三大部分,其中趋势项、季节项一般当作非随机项处理,研究时间序列就是弄清楚这三部分的变化趋势和变化规律,非随机项一般来说较为简单且有规律可循,对于随机项来讲,其相对稳定,但没规律可循,研究起来较为困难。所以研究时间序列就是在分析判断出非随机项并找出其规律的基础上,对随机项进行预测。基本形式<sup>[19]</sup>为

$$Y_t = T_t + S_t + E_t \quad (1)$$

式中: $Y_t$ 为待挖掘数据; $t$ 为时间因子; $T_t$ 为长期趋势项; $S_t$ 为季节项; $E_t$ 为随机项,通常分为突然变动和随机变动两类。

## 2 研究区概况及钻孔点位布置

华北平原,也被称为黄淮海平原,在地理上处于我国大东部地区,地处北纬 $32^\circ \sim 40^\circ$ ,东经 $114^\circ \sim 121^\circ$ ,向北延伸至燕山南麓,向南可达大别山地域,属于新生代的巨大拗陷。地势大多低并且平缓,平均海拔不超过50 m,东部沿海一带区域海拔较低,平均在10 m以下<sup>[20]</sup>。在地貌上,华北平原自西向东出现多种地形地貌:洪积平原-洪积、洪积平原-冲积平原-海积平原,整体上自西向东倾斜。受气候及人为因素影响,旱灾情况较为突出,其中春旱情况最为严重,降雨量较少,河流径流量较少。

根据已有资料可知华北平原山前(石家庄)—中部平原(衡水)—滨海(沧州)这一长剖面在水平方向上沉积环境主要为:太行山山前冲洪积扇中、滹沱河洪积冲积扇前缘、槐沙河洪积冲积扇的北部和扇间洼地过渡至湖泊洼地和滨海沉积,以边滩、心滩、天然堤、决口扇等数十种沉积微相为主。在垂向上,

其地层沉积年代主要包括中更新世、晚更新世和全新世,华北平原山前至滨海长剖面表征了一个完整的地下水循环系统,详细刻画了地层沉积物粒度分布特征、含水层结构、孔隙度、岩性和水位等一系列水文地质参数的时空变异性。该剖面在水平和垂直方向上几乎囊括了华北平原形成含水层所有典型的沉积微相类型,为本次研究提供了良好的数据基础。因此,选择华北平原山前(石家庄)—中部平原(衡水)—滨海(沧州)这一长剖面为研究对象,在该剖面自西向东依次选取 8 个钻孔(见图 1),孔深 110 m,每隔 2 m 对沉积样品进行取样,探究渗透系数在这 8 个钻孔内的空间变异性。



图 1 华北平原山前至滨海区钻孔分布

Fig. 1 Location map of the distribution of boreholes from piedmont to coastal area in North China Plain

### 3 渗透系数的计算

为了能够在钻孔中由浅到深获得连续渗透系数,提高渗透系数计算精度,并且使渗透系数的计算成本降到最低,对于粉质样品利用数值模拟反演公式对渗透系数进行计算,对于砂质样品则采用改进的 Archie 公式对渗透系数进行计算。

#### 3.1 构建山前区不同沉积微相下渗透系数反演公式

以华北平原山前区为例,山前区共有河漫滩、扇间滩地、河床滞留沉积、天然堤等 4 种沉积微相,通过传统的粒度特征经验公式,以及室外双环渗透试验和室内土柱渗透试验,共完成 180 组渗透试验,可得实测渗透系数值。以相控建模原理为指导,利用多元线性回归技术构建山前区不同沉积微相下渗透系数反演公式,见表 1。

表 1 山前区不同沉积微相渗透系数反演公式

Tab. 1 Inversion formula for permeability coefficient of different sedimentary facies in the piedmont area

沉积微相	反演公式
河漫滩	$K=2.818d_{10}+0.008d_{50}-0.036d_{90}-0.773$
扇间滩地	$K=0.074d_{10}+0.58d_{50}+0.0036d_{90}-2.6771$
河床滞留沉积	$K=1.535d_{10}+1.077d_{50}-0.018d_{90}-3.431$
天然堤	$K=1.057d_{10}+1.233d_{50}-0.026d_{90}-6.119$

注:  $K$  为渗透系数;  $d_{10}$  为累计分布曲线中样品重量占总样品重量 10% 时的粒径大小;  $d_{50}$  为累计分布曲线中样品重量占总样品重量 50% 时的粒径大小;  $d_{90}$  为累计分布曲线中样品重量占总样品重量 90% 时的粒径大小。

#### 3.2 改进的 Archie 公式

Archie 推出了电阻率测井的两个响应方程,创造性地提出了测井解释中两个最基本的参数和解释关系式,被称为阿尔奇公式,在此基础上,本次研究将阿尔奇公式应用到渗透系数的计算当中,提出改进公式(2)和(3)。

$$K=QSR_w^2 \quad (2)$$

$$1/F=1/F_i+(QS/F_i)R_w \quad (3)$$

式中:  $K$  为渗透系数;  $Q$  为岩石单位孔隙体积的阳离子交换量,  $\text{meq}/\text{cm}^3$ , 范围 0~1;  $S$  为颗粒表面附近阳离子的平均迁移率;  $R_w$  为岩石所含地层水的电阻率;  $F$  为地层因素(或相对电阻率),其大小与岩样的孔隙度、胶结情况和孔隙形状有关。

### 4 垂向渗透系数空间变异性的分析和讨论

#### 4.1 影响因素分析

传统研究认为,由于受地层压力的影响,孔隙压缩变小,从而使含水介质的渗透能力随深度不断降低,即认为渗透系数随深度的增加而不断衰减,但其在研究渗透系数随深度空间变异性的过程中,仅考虑地层压力,而未考虑沉积环境和随机误差对渗透系数的影响。值得注意的是,渗透系数在垂向上受黏粒含量、有机质、粒度特征、化学成分、地层压力、计算误差等多种因素的影响<sup>[21]</sup>,其中黏粒含量、有机质、粒度特征、化学成分等因素主要与地层沉积环境有关。因此,渗透系数在垂向上的影响因素主要可分为三大类:沉积环境、地层压力、随机误差(计算误差和测量误差)。其中沉积环境和地层压力均与埋藏深度有关,华北平原第四系松散沉积物主要由海河、滹沱河、子牙河、滏阳河等冲洪积扇所组成,在垂向上具有强烈空间变异性,在钻孔中由浅到深呈现出多个沉积旋回。地层的沉积旋回、地层压力的变化以及随机误差等都对渗透系数产生影响,使其在垂向上随深度呈现出强烈的空间变异性,

在实际中难以用一种简单线性衰减模式对其进行刻画,因而需进一步研究这3种因素对渗透系数的影响机制。

#### 4.2 基于随机森林算法的沉积环境特征因子分析

在随机森林算法中为了计算每个变量对分类树每个节点上观测值的异质性影响,引入了Gini(基尼)指数,且Gini值越大表示该变量的重要性越大<sup>[19]</sup>。在不同研究区内,各因子也会有所差异,进而对渗透系数的影响也会有所不同,所以用各因子基尼指数的大小来判断其对渗透系数空间变异性的影响恰好符合这一特性。利用随机森林算法所得结果见图2。

在构建时间序列模型中的时间因子前,首先利用随机森林算法,从物理、化学因素中挑选对渗透系数影响较大的因子,并对这些因子的重要性进行排序。从图2可得出不同钻孔中黏粒含量、有机质、粒度特征、化学成分等各影响因子的Gini指数大小,在不同钻孔中对渗透系数影响最大的因子依次为:Na<sub>2</sub>O、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Silt、Na<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O。化学因素占87.5%,其中Na<sub>2</sub>O占62.5%,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>分别占12.5%。物理因素中Silt(粉土)占12.5%。然后再将这些因子做垂向上的循环周期,以此循环周期作为构建渗透系数时间序列的时间因子。

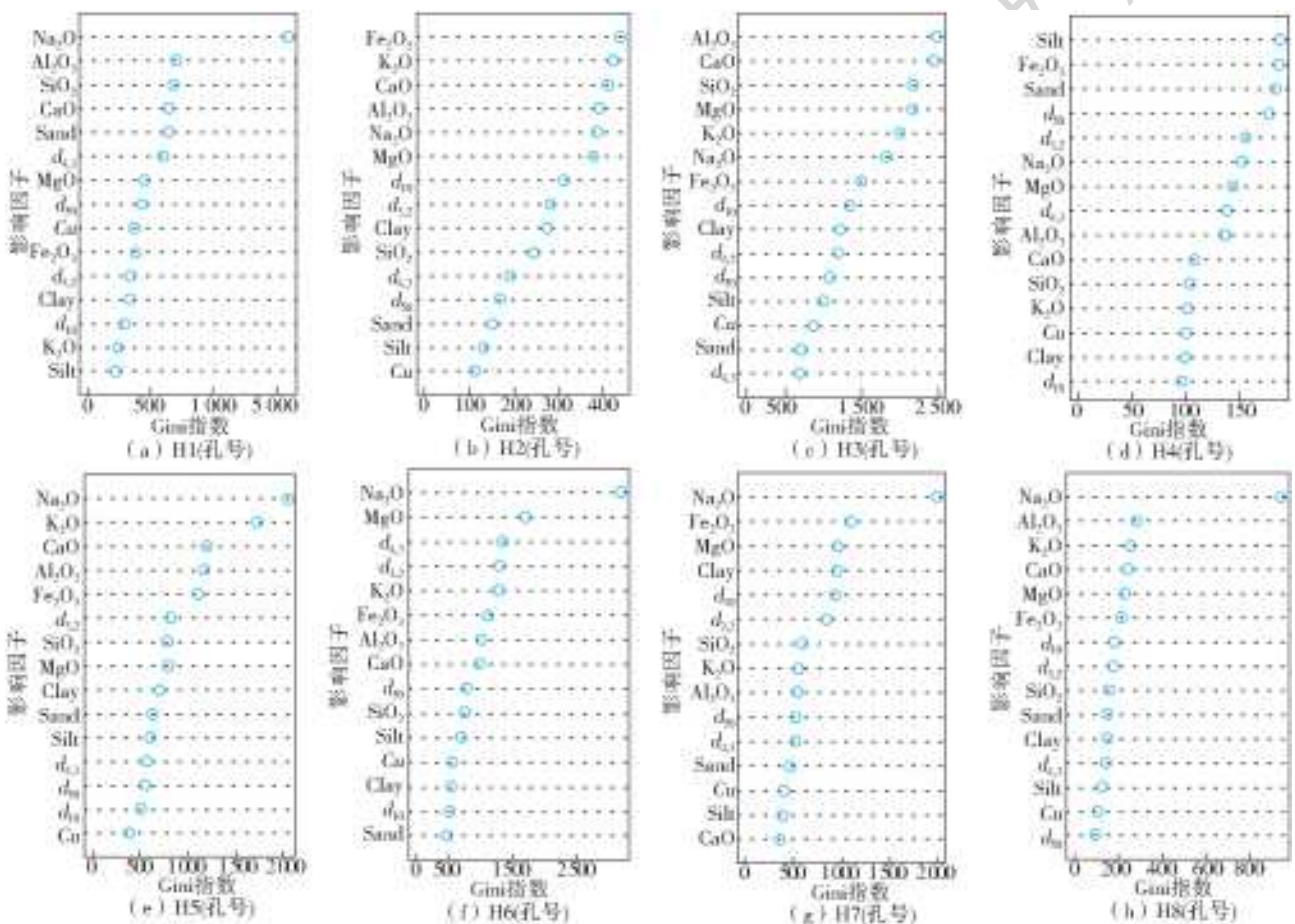


图2 不同钻孔中各影响因子Gini指数值

Fig. 2 Gini index value for each impact factor in different drilling

#### 4.3 基于时间序列算法的垂向渗透系数空间变异性分析

利用时间序列算法,根据渗透系数的主要影响因素,将其在垂向上的空间变异性分离为周期循环变化、趋势变化、随机变化等3部分,并对垂向渗透系数空间变异性进行分析,具体流程如下:

(1)构建渗透系数在垂向上的时间序列模型。对影响渗透系数最为重要的沉积环境特征因子在垂

向上做循环周期(图3),以此循环周期作为构建渗透系数时间序列的时间因子,以地层深度作为影响因素,以整个循环周期作为1个时间年,以此来构建渗透系数—深度的时间序列。

从各因子循环周期图来看,其曲线随时间或高低起伏或平缓,在表现形式上呈一定周期性变化,这主要是地层的沉积旋回所导致,与时间序列三大部分中周期循环部分相契合。



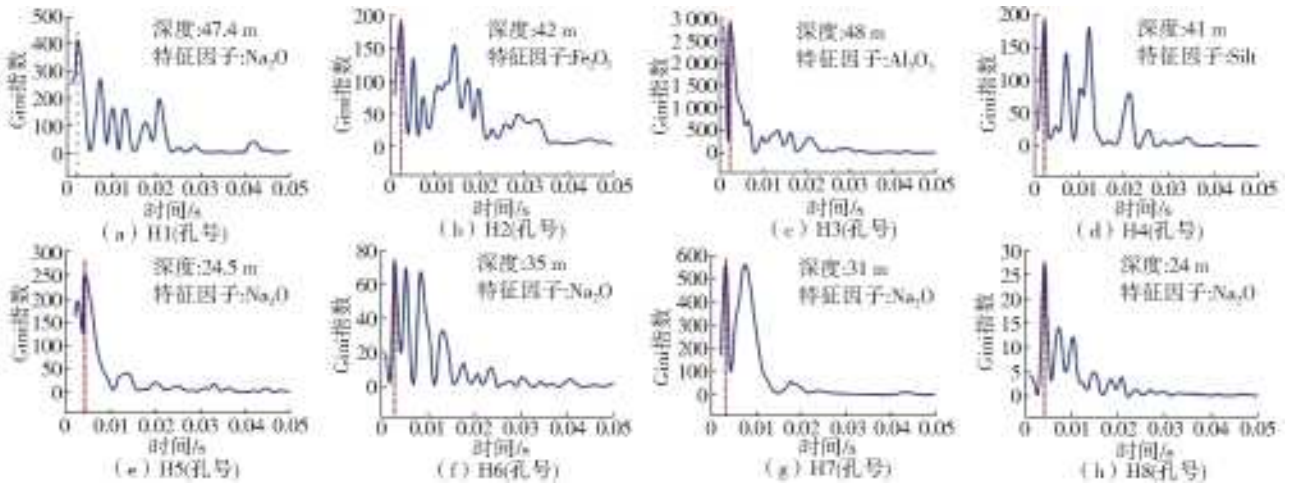


图 3 不同钻孔中不同因子循环周期

Fig. 3 Cycle period diagram of different factors in different drilling

(2)在构建渗透系数-深度时间序列时(图 4), 将周期循环变化、趋势变化、随机变化分别作为时间

序列中的  $S_t$  为季节项、 $T_t$  为长期趋势项、 $E_t$  为随机项, 渗透系数用  $K$  表示。

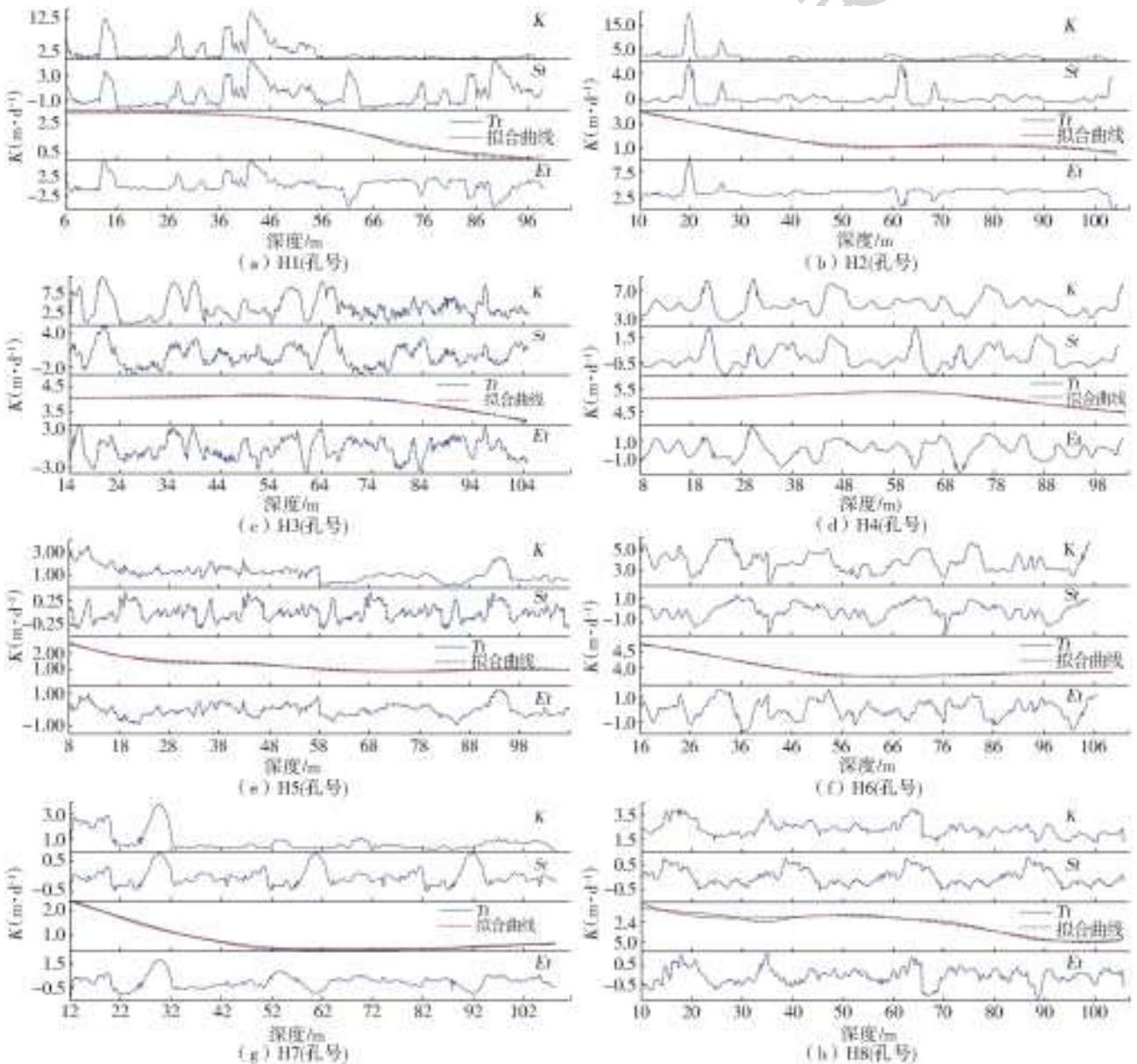


图 4 不同钻孔中渗透系数变化

Fig. 4 Variation diagram of permeability coefficient at different drilling

图4表明渗透系数的趋势变化部分在地层压力的作用下随深度不断衰减,但其衰减模式有显著差异性,主要可分为三大类:(1)主要包括H1、H3、H4等3个钻孔,在一定深度范围内渗透系数随着深度的增大并未显著衰减,当到达某个临界值后渗透系数急剧降低。(2)主要包括H2、H5、H6、H7等4个钻孔,渗透系数先是显著降低,随后渗透系数变化较为平缓。这表明孔隙度在地层压力作用下已经达到极限值,从而导致渗透系数并未随深度一直衰减。(3)只包括H8号钻孔,其在上覆地层压力作用下,随深度持续衰减。

上述3种不同的衰减模式表明沉积环境和地层压力在不同深度对渗透系数的影响有显著差异:在第一类衰减模式中,在接近地表的一定深度范围内渗透系数的空间变异性主要受沉积环境的影响,地层压力对深层渗透系数空间变异性影响较大;在第二类衰减模式中,在接近地表的一定深度范围内渗透系数的空间变异性主要受地层压力的影响,深层渗透系数空间变异性主要受沉积环境的影响;在第三类衰减模式中,渗透系数在地层压力和沉积环境的共同作用下随深度不断发生变化。

在剔除沉积环境及随机误差的影响后,定量分析华北平原山前至滨海区渗透系数随地层压力,即与深度之间的衰减模式(图5)。通过对上述8个钻孔衰减模式定量研究发现,渗透系数在山前地区受地层压力的作用变化最为剧烈,在中部地区略微减小,在滨海地区渗透系数在地层压力的作用下衰减幅度只有0.5 m左右,这表明在山前地区渗透系数对压力的变化最为敏感。总体看来,由山前至滨海渗透系数对压力的敏感性逐渐减弱。

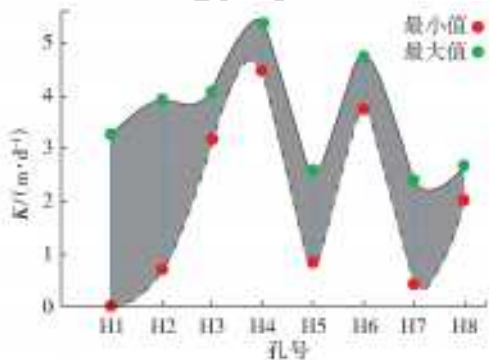


图5 山前至滨海区渗透系数衰减模式

Fig. 5 Decay mode diagram of the permeability coefficient from piedmont to the coastal area

## 5 结论

在渗透系数的计算过程中,需针对具体的水文

地质条件和研究对象,选择合适的计算方法。本次研究将渗透系数划分为极小、小、普通、大、极大等5个不同等级,通过对渗透系数反演公式以及改进Archie公式的构建得知,华北平原山前至滨海区渗透系数平均值为7.61~11.83 m/d,  $\text{Sig} < 0.05$ ,不符合正态分布,数值主要集中在小、普通两个等级之间,极小、大和极大等3个等级渗透系数分布区域较小,其中大和极大渗透系数在垂向上随深度不断衰减,极小渗透系数在垂向上具有较强的空间变异性。

华北平原山前至滨海区渗透系数在垂向上的影响因素主要可分为三大类:沉积环境、地层压力、随机误差。研究区地层的沉积旋回特性使地层沉积物粒度和化学组分等变化在垂向上呈现出显著的周期性,从而进一步对渗透系数产生周期性影响;地层压力则随深度的增大而增加;随机误差则使渗透系数在垂向上呈白噪声序列,在渗透系数计算过程中,随机误差主要是由仪器的测量误差、计算方法的选取,以及计算过程有效位数的取舍等因素所引起的,具有强烈的随机性和非确定性。在这3种因素的共同作用下,渗透系数在垂向上随深度呈现出的空间变异性更加明显。

在剔除沉积环境、随机误差对渗透系数影响的基础上,时间序列算法分析出华北平原山前至滨海区渗透系数在地层压力作用下随深度的衰减模式。研究区渗透系数的衰减模式呈现出显著差异,其在山前地区对地层压力最为敏感,从山前至滨海区,敏感性显著降低,在滨海地区,在地层压力的作用下,渗透系数随深度的空间变异性较弱。总体来说山前至滨海区渗透系数随着深度的增大,对地层压力的敏感性呈逐渐递减的趋势。

## 参考文献:

- [1] LOUIS C. Rock hydraulics in rock mechanics[J]. Edited by L. Muller, Verlay Wien, New York, 1974(165): 299-387. DOI: 377. rm. cglhub. com/10. 1007/978-3-7091-4109-0\_16.
- [2] 王仕琴,邵景力,崔亚莉,等. 地下水模拟软件 MODFLOW 的特点及其与 GIS 的整合[A]. 全国地下水资源与环境学术研讨会[C]. 2005.
- [3] 赵佳莉. 格尔木河河床沉积物渗透系数变异性研究[D]. 西安:长安大学,2014. DOI:10. 7666/d. D557781.
- [4] 介飞龙,李升. 河床垂向渗透系数空间变异性三维分析[J]. 人民黄河,2018,40(4): 49-54. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2018. 04. 012.
- [5] 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. DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-6791. 2005. 02. 010.
- [6] SRIVASTAVA A, BABU G L S, HALDAR S. Influence of spatial variability of permeability property on steady state seepage flow and slope stability analysis [J]. *Engineering Geology*, 2010, 110 (3-4): 93-101. DOI: 10. 1016/j. enggeo. 2009. 11. 006.
- [7] SUNG Eun Cho. Probabilistic stability analysis of rainfall-induced landslides considering spatial variability of permeability [J]. *Engineering Geology*, 2014 (171): 11-20. DOI: 10. 1016/j. enggeo. 2013. 12. 015.
- [8] LU C, CHEN X, OU G, et al. Determination of the anisotropy of an upper streambed layer in east-central Nebraska, USA [J]. *Hydrogeology Journal*, 2012, 20(1): 93-101. DOI: 10. 1007/s10040-011-0792-4.
- [9] GENEREUX D P, LEAHY S, MITASOVA H, et al. Spatial and temporal variability of streambed hydraulic conductivity in West Bear Creek, North Carolina, USA [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 358 (3-4): 332-353. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2008. 06. 017.
- [10] 于欣. 陕西省宝鸡地区黄土渗透系数的各向异性 and 尺度效应研究 [D]. 西安: 长安大学, 2016. DOI: CNKI: CDMD: 2. 1016. 920869.
- [11] 张波, 宋进喜, 曹明明, 等. 渭河陕西段河床渗透系数时空变化规律及其机制研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30 (6): 184-190. DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2016. 202.
- [12] VERWEIJ H, VIS G J, IMBERECHTS E. Spatial variation in porosity and permeability of the rupel clay member in the Netherlands [J]. *Netherlands Journal of Geosciences*, 2016, 95(3): 253-268. DOI: 10. 1017/njg. 2016. 28.
- [13] 孙晓涵. 西安地面沉降与砂土蠕变关系初探 [D]. 西安: 长安大学, 2011. DOI: 10. 7666/d. Y1947689.
- [14] CATANI F, LAGOMARSINO D, SEGONI S, et al. Landslide susceptibility estimation by random forests technique: sensitivity and scaling issues [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, 13 (11): 2815-2831. DOI: 10. 5194/nhess-13-2815-2013.
- [15] BO Z, PENG M, AIHUA N, et al. Land cover mapping using time series HJ-1/CCD data [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57 (8): 1790-1799. DOI: 10. 1007/s11430-014-4877-5.
- [16] CHAUSSARD E, WADOWINSKI S, CABRAL-CANO E, et al. Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140 (1): 94-106. DOI: 10. 1016/j. rse. 2013. 08. 038.
- [17] 罗传义, 时景荣. 逐步回归分析 VBA 程序 [J]. *吉林化工学院学报*, 2007, 24 (4): 56-60. DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2853. 2007. 04. 018.
- [18] 宋新阳, 刘子媛, 王从岗. 随机森林算法在石油馏分临界性质预测中的应用 [J]. *广州化工*, 2016, 44 (20): 71-73. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-9677. 2016. 20. 027.
- [19] MALYUTINA E I, SHIRYAEV V I. Time series forecasting using nonlinear dynamic methods and identification of deterministic chaos [J]. *Procedia Computer Science*, 2014, 31: 1022-1031. DOI: 10. 1016/j. procs. 2014. 05. 355.
- [20] 迟潇潇. 1960—2009 年中国极端降水时空特征及风险分析 [D]. 上海: 上海师范大学, 2016. DOI: CNKI: CDMD: 2. 1016. 133515.
- [21] 马荣, 石建省, 刘继朝. 人工内分泌网络模型在水文地质参数研究中的应用 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2013, 43 (3): 914-921.