

基于含水层非均质性随机特征的地下水脆弱性评价

李培熙¹, 杨桂莲², 李伟³, 朱伟⁴, 秦巍¹, 鲁程鹏¹

- (1. 河海大学水文与水資源学院, 江苏 南京 210098; 2. 水利部信息中心, 北京 100053;
3. 南京水利科学研究所水文与水資源研究所, 江苏 南京 210029;
4. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘要:由于地质条件的复杂性,人们所能获取的地质和水文地质资料是有限的,这就导致对水文地质条件的认识具有不确定性,其中以含水层非均质特征最为显著,这对地下水脆弱性评价显然会产生显著的影响。考虑含水层的非均质特性,提出具有非平稳随机场空间相关性的地下水脆弱性评价方法。以南京市江宁区中部地区为例,用改进的连续随机增加方法(Successive Random Additional method, 简称 SRA)生成了渗透系数对数($\ln K$),具有分维 Levy 运动统计特征的随机场,模拟含水层渗透系数可能的非均质空间分布,采用 DRASTIC 方法进行地下水脆弱性评价。结果表明由此方法生成的渗透系数场变化的程度相对传统的普通克里金方法更加剧烈,更加符合复杂分布的非平稳随机场特征,在此基础上建立的地下水脆弱性评价更加符合客观事实,丰富和发展利用随机理论解决地下水环境问题的理论和方法。

关键词:地下水脆弱性评价;含水层非均质特征;随机理论;渗透系数

中图分类号:P641

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2019)01-0056-04

地下水资源是水资源的重要组成部分,对区域经济社会发展的支撑日益明显。地下水脆弱性反映地下水系统遭受污染的可能性,通过地下水脆弱性研究,可识别研究区地下水系统潜在的抗污染性和易污染性。由于含水层的非均质性控制着地下水渗流和溶质迁移特性^[1],无法完全掌握真实的地质和水文地质信息,这给地下水问题的研究带来很大不确定因素。要获取较为精准的含水层参数,需要大量的钻探、水文地质实验等,耗费大量人力物力,可行性较低。含水层非均质特征的不确定性,一方面降低了地下水问题研究的可靠性和实用性,另一方面表明传统确定性方法在实际应用中的局限性。针对这一局限性,不少学者以不确定模型为基础,运用蒙特卡罗法进行含水层参数的模拟^[1,2]。目前大多数对地下水的随机模拟均假设渗透系数(K)的对数 $\ln K$ 为统计均匀(平稳)随机场,且 $\ln K$ 服从正态分布^[3,4]。但由于实际含水层的强非均质性对应着复杂非平稳随机数场,此类方法得到的平稳随机场并不能代表实际情况^[5]。而对于含水层特性中的渗透系数的非平

稳特征,不少学者认为可以用分维模型进行描述^[6,7]。

在假设 $\ln K$ 遵循 Levy 稳定分布的基础上,本文将采用更加能实现介质渗透性的强变异特征的分维 Levy 运动 (fLm),以南京市江宁区中部地区为例,模拟含水层渗透系数可能的非均质空间分布,对比普通克里金插值法(Ordinary Kriging, 简称 OK 法)得到的渗透系数场,结合 DRASTIC 评价方法,提出一种能改进的更有效反映含水层非均质性的 DRASTIC 评价模型。

1 研究区概况

南京市江宁区位于长江下游南岸,北纬 $30^{\circ}\sim 32^{\circ}$ 、东经 $118^{\circ}\sim 119^{\circ}$ 之间,东西宽 33km,南北长 57km,总面积 1 573km²。本文以中部地区的江宁技术开发区为主要研究对象,模拟范围西起吉山及吉山水库,和牛首山、祖堂山沿线,东至青龙山-大连山,东南至汤铜公路,北起秦淮新河、东山老城和上坊地区,南至禄口新城、城市三环,研究区总面积 584.6km²。研究区具体水文地质资料来源可参考文献[8]。研究区及周

收稿日期:2018-06-01

作者简介:李培熙(1995-),男,广东茂名,本科生,主要从事水文水资源研究工作。E-mail:756405547@qq.com

通讯作者:朱伟(1978-),男,江苏无锡人,工程师,主要从事环境影响评价、环境工程研究工作。E-mail:670416620@qq.com

边(见图1)共计获取52组含水层渗透系数,具体数据来源可参考文献[9]。

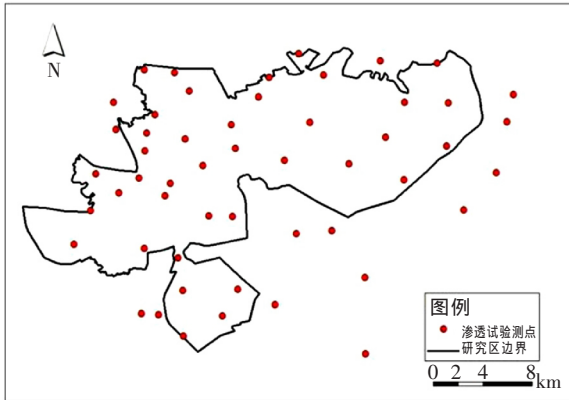


图1 研究区渗透试验测点分布

Fig.1 The distribution of the test points in the study area

2 基本理论

含水层的非均质性强烈地影响了地下流体的流动和溶质运移,很多学者对此提出了算法公式和计算程序。在本文中参考Lu等^[10]提出的一种连续随机添加的有效的、三维的、各向异性的算法方法,即SRA法,这种方法最重要的原理是分维Levy运动(fLm)。

2.1 渗透系数场的生成

本文对研究区渗透系数场采用2种不同处理方法。一种是使用OK法得到整个研究区的渗透系数场,这种方法是研究渗透系数场时被普遍接受的一种方法。本文以OK法的模拟结果为参照来对比SRA方法得到的渗透系数场结果。fLm法是使用SRA算法来构造符合fLm分布的渗透系数随机分布的方法。其中根据Fama^[11]提出的方法估计宽度参数C和Levy指数 α ,再通过分维Levy运动的随机变量的仿射不变性^[12]推导出Hurst系数。本文仅对fLm法的具体步骤进行介绍。

Levy稳定分布的密度函数可表示为^[12]:

$$L_\alpha(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \exp(-|Ck|^\alpha) \cos(kx) dk$$

式中:C为宽度参数; $\alpha(0 < \alpha < 2)$ 为决定 $L_\alpha(x)$ 分布整体特征的指数;同时 α 表征 $L_\alpha(x)$ 空间分布偏离正态分布的程度, α 越小,其偏离程度越明显^[13]。

$$C_{rh}^\alpha = C_h^\alpha r^{\alpha H} \Rightarrow C_{rh} = C_h r^H$$

式中:r为滞后系数; C_h 和 C_{rh} 分别表示增量间距为h和rh时的宽度参数;H为Hurst系数($0 < H < 1$)。

本文运用高效的三维连续随机添加(SRA)算法来构造空间lnK分布,即通过已知的数据点进行模拟生成具有fLm统计特征的渗透系数的随机数场。

2.2 评价模型与评价等级划分

本文中评价模型参照DRASTIC指标体系,DRASTIC指标体系由美国环境保护署(USEPA)于1987年首先提出,它采用7个影响和控制地下水流和污染物运移、对含水层脆弱性影响最大的参数构成评价指标体系,即地下水埋深、净补给量、含水层岩性、土壤类型、地形坡度、包气带岩性及渗透系数。DRASTIC即由上述7项指标的英文代表字母组成。由于研究区地下水埋深较浅,使DRASTIC指标体系中的土壤类型指标和包气带岩性指标定义重复,而研究区内土地利用布局与结构也随之剧烈调整,下垫面的变化会对地下水的脆弱性产生影响,故本次参考张珍^[8]的做法,采用土地利用类型指标替代土壤岩性指标。本文按照国际标准的DRASTIC指标权重配比方案进行分配^[14]。

DRASTIC地下水脆弱性指数是对上述7个评价指标进行评分后的加权求和值。

$$DRASTIC = \sum_i^n (W_i \times R_i)$$

式中:DRASTIC为地下水脆弱性指数,无量纲; W_i 为指标i的归一化权重,无量纲; R_i 为指标评分,无量纲;n为参与评价的指标个数, $n=7$ 。

其中评价体系中各指标归一化权重如表1。

表1 DRASTIC指标体系中各评价指标权重

Table1 The Weight of each evaluation index in the DRASTIC index system

评价指标	权重	归一化权重
地下水埋深	5	0.22
净补给量	4	0.17
含水层岩性	3	0.13
土地利用类型	2	0.09
地形坡度	1	0.04
包气带岩性	5	0.22
渗透系数	3	0.13

正常情况下,DRASTIC地下水脆弱性指数的范围在0~10之间。它只是一个相对概念,脆弱性大,表明该区域的相对地下水脆弱性就越高,该地区的地下水相对来说就越容易受到污染,反之亦然。按照评分结

果进行相等间隔的分级方法，将脆弱性等级分为 I、II、III、IV、V 五级，等级数值越小，表示地下水脆弱性越低，地下水越不易被污染，反之，则表示地下水脆弱性越高，地下水越易被污染。

3 模拟结果评价及分析

3.1 渗透系数场模拟结果和分析

本文根据实测渗透点推求得 $\alpha=1.6, C=0.6, H=0.4$ ，并采用推求结果进行数据 SRA 算法运算。由模拟结果 (见图 2) 可以看出，研究区中部和东北部区域渗透系数相对较强，但两个方法具有一定的差异，但整体分布上，两个结果具有一定的相似性，这主要受控于区域水文地质条件和现场试验的空间分布密度。相对于图 2a 所示的渗透系数场，fLm 法的渗透系数场 (见图 2b) 在空间变化的程度更加剧烈，渗透系数场在空间连续性上不再平稳变化，更加符合复杂分布的非平稳随机场，更加符合实际的含水层强非均质性。

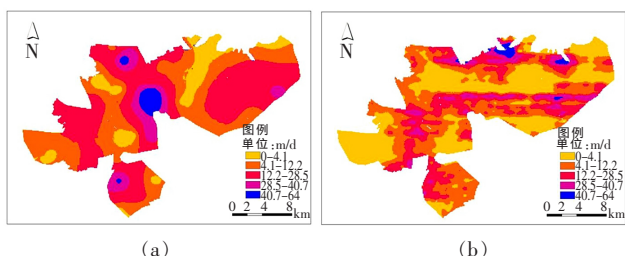


图 2 基于 OK 法(a)和 fLm 法(b)的生成的模拟渗透系数场
Fig.2 The simulation of permeability coefficient field based on OK method (a) and fLm method (b)

3.2 地下水脆弱性评价结果和分析

分别用 OK 法和 fLm 法模拟的渗透系数随机场作为指标进行 DRASTIC 评价分析，其中除渗透系数场以外的指标均参照张珍文献里面的结果^[8]。在对两种方法进行 DRASTIC 评价分析得到两种评价结果，它们的脆弱性指数在 1.6~6.8 之间，在相同的标准下进行脆弱性分级，见表 2。

表2 脆弱性指数分级表

Table2 The classification of vulnerability indexes

脆弱性指数	<3	3~4	4~5	5~6	>6
脆弱性分级	I	II	III	IV	V

图 3a 所示为 fLm 法进行的 DRASTIC 评价结果，我们可以看出脆弱性等级 I 级的地区主要分布在研究

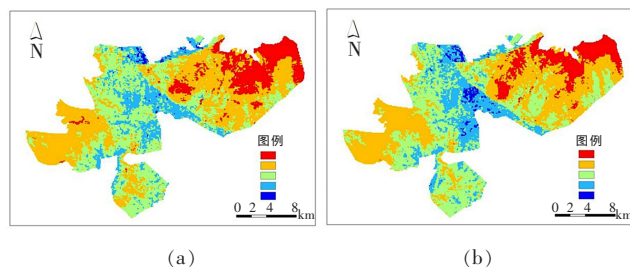


图 3 基于 fLm 法(a)和 OK 法(b)的 DRASTIC 评价结果
Fig.3 The DRASCIT evaluation results based on fLm(a) and OK (b) methods

区东北部，该区域含水层岩性主要为砂质夹碎石、粘土等，含水层封闭性好，人类活动弱，因此对地下水环境影响最小。II 级区域主要分布在研究区东部、西部和南部地区。其中东部和西部地区主要为农村居民用地或森林，人类活动少，而南部地区包气带岩性为粉质土壤，包气带自净能力强，这些因素使得地下水脆弱性偏低。III 级、IV 级略高的脆弱性地区主要集中在研究区中部和南部，这些地区地形坡度平坦，人类活动频繁，地下水埋深浅，故极易受到污染。而脆弱性指数更高的 V 级则零散地分布在研究区中部脆弱性分级为 IV 级的区域。整体上看，研究区倾向于易受污染，脆弱性偏高，这与实际情况基本吻合。

图 3b 为 OK 法的 DRASTIC 评价结果，根据面积占比表和两种方法的评价结果区域对比，整体上两种模型得到的含水层脆弱性等级分布范围和变化走势大致相同。同时也可以看出 fLm 法使地下水脆弱性等级整体相对 OK 法低，fLm 法的评价图相对更加不连续。这些区别都由于克里金插值和 fLm 算法生成随机场的区别。克里金插值是根据测点空间位置不同、样品间相关程度的不同，对每个测点数据赋予不同的权，进行滑动加权平均，以估计中心块段平均数据，这是一种线性无偏估计；而 Levy 稳定分布的主要特征是它的概率密度函数尾部衰减缓慢而且具有无限的二阶矩和高阶矩，很好地描述了强变异参数的随机变化特征，所以 fLm 法生成的渗透系数场在小尺度内急剧变化，更具强变异性的特征。

4 结语

本文以江宁中部地区地下水脆弱性评价为例，对比分析了两种渗透系数空间分布的解构模型对脆弱性评价的影响。随机模型与确定性模型相比，方法简单实用，且能够实现非平稳随机渗透系数场的模拟，

避免了确定性模型评价渗透系数场随机特性的功能缺失的不足。通过本文研究得到结论如下:

(1)在地下水数值模拟中,由于含水层非均质性的存在,不确定性模型相对确定性模型更加适合模拟含水层参数的非均质空间分布。由于实际含水层的强非均质性,非平稳随机场能更好地描述含水层参数的非均质特征,从而更加合理地反映真实水文地质情况,在不确定性模型的基础上建立的地下水脆弱性评价更具有可靠性。

(2)本文采用一种能描述局部区域内介质渗透性强变性特征的方法,该方法更能描述局部区域内小尺度上急剧变化的渗透系数的空间变异性,并很好地结合了地下水脆弱性评价模型,物理意义明确,适用于小尺度范围含水层参数模拟和地下水脆弱性评价。

参考文献:

- [1] 覃荣高,曹广祝,许彦卿.非均质含水层中渗流与溶质运移研究进展[J].地球科学进展,2014,29(01):30-41.(TAN Ronggao,CAO Guangzhu, WU Yanqing, et al.Review of the study of groundwater flow and solute transport in heterogeneous aquifer [J].Advances in Earth Science,2014,29(01):30-41.(in Chinese))
- [2] 陈彦,吴吉春.含水层渗透系数空间变异性对地下水数值模拟的影响[J].水科学进展,2005(04):482-487.(CHEN Yan, WU Jichun, et al.Effect of the spatial variability of hydraulic conductivity in aquifer on the numerical simulation of groundwater [J].Advances in Water Science,2005(04):482-487.(in Chinese))
- [3] 阎婷婷,吴剑锋.渗透系数的空间变异性对污染物运移的影响研究[J].水科学进展,2006(01):29-36.(YAN Tingting, WU Jianfeng, et al. Impacts of the spatial variation of hydraulic conductivity on the transport fate of contaminant plume[J].Advances in Water Science, 2006(01):29-36.(in Chinese))
- [4] 黄冠华.非饱和水流动态空间变异的随机分析[J].水利学报,1999(04):76-81.(HUANG Guanhua. Stochastic analysis of spatial variability for variables of unsaturated flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,1999(04):76-81.(in Chinese))
- [5] Molz F J,Boman G K. A fractal-based stochastic interpolation scheme in subsurface hydrology [J].Water Resources Research, 1993,29(11):3769-3774.
- [6] Hewett T A.Fractal Distributions of Reservoir Heterogeneity and their Influence in Fluid Transport [A].The 61st Annual Technical Conference [C].Soc. of Pet.Eng.,New Orleans,U.S.,1986.
- [7] Painter S.Stochastic interpolation of aquifer properties using fractional Lévy motion [J].Water Resources Research,1996b, 32(5): 1323-1332.
- [8] 张珍,温忠辉,鲁程鹏,等.改进的 DRASTIC 地下水脆弱性评价模型及应用[J].水资源保护,2014,30(06):13-18. (ZHANG Zhen,WEN Zhonghui,LU Chengpeng,et al.A modified DRASTIC model for assessment of groundwater vulnerability and its application [J]. Water Resources Protection,2014,30(06):13-18.(in Chinese))
- [9] 齐世鹏.土壤饱和和渗透系数计算模型对比研究[D].南京:河海大学,2015. (QI Shipeng.Comparison of Soil Saturated Hydraulic Conductivity Computing Models [D].Nanjing:Hohai University,2015. (in Chinese))
- [10] LU S L,Molz F J,LIU H H.An efficient,three -dimensional, anisotropic,fractional Brownian motion and truncated fractional Levy motion simulation algorithm based on successive random additions[J].Computers & Geosciences,2003,29(1):15-25.
- [11] Fama E F, Roll R.Parameter estimates for symmetric stable distributions [J].Journal of the American Statistical Association, 1971,66(334):331-338.
- [12] Mantegna R N.Fast,accurate algorithm for numerical simulation of Levy stable stochastic processes [J].Physics Review E,1999,49(5): 4677-4683.
- [13] 黄冠华,ZHAN Hong-bin,叶自桐.水力传导度空间变异性的分形模拟研究进展[J].水科学进展,2003(02):236-241.(HUANG Guanhua, ZHAN Hongbin, YE Zitong, et al.Review on modeling of hydraulic conductivity with fractal theory [J]. Advances in Water Science,2003(02):236-241.(in Chinese))
- [14] Aller L,Bennett T,Lehr J H,et al.DRASTIC:a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings [R].Washington:US EPA,1987.

Groundwater Vulnerability Assessment Based on Random Characteristics of Aquifer Heterogeneity

LI Peixi¹, YANG Guilian², LI Wei³, ZHU Wei⁴, QIN Wei¹, LU Chengpeng¹

(1. College of Hydrology and Water Resources Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Information Center,MWR,Beijing 100053,China; 3. Hydrology and Water Resources Department of Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Nanjing 210042, China)

Abstract: Due to the complexity of geological conditions, the geological and hydrogeological data available to the people are limited, which leads to the uncertainty in the understanding of hydrogeological conditions. Among them, the heterogeneity of aquifers is the most significant one, which would have a significant impact on the assessment of groundwater vulnerability. This paper considered the heterogeneity of aquifers and proposed a groundwater vulnerability assessment method with non-stationary random

(下转第6页)

- China Ser(E-Tech Sci),2009,39(9):1529-1534. (in Chinese))
- [11] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J].模糊系统与数学,2000,14(2):80-88.(ZHANG Jijun. Fuzzy analytical hierarchy process[J].Fuzzy Systems and Mathematics, 2000,14(2):80-88. (in Chinese))
- [12] 金菊良,洪天求,王文圣. 基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型 [J]. 水力发电学报,2007,26 (4):22-28.(JIN Juliang, HONG Tianqiu, WANG Wensheng. Entropy and FAHP based fuzzy comprehensive evaluation model of water resources sustaining utilization [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007,26(4):22-28. (in Chinese))
- [13] 王文圣, 张翔, 金菊良等. 水文学不确定分析方法[M].北京:科学出版社,2011:339-341. (WANG Wensheng, ZHANG Xiang, JIN Juliang, et al. Method of Uncertainty Analysis for Hydrology [M]. Beijing:Science Press,2011:339-341. (in Chinese))
- [14] 程乾生. 属性集和属性综合评价系统 [J]. 系统工程理论与实践, 1997,17 (9):1-8. (CHENG Qiansheng. Attribute sets and attribute synthetic assessment system [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1997,17(9):1-8. (in Chinese))
- [15] 金菊良,宋占智,崔毅,等.旱灾风险评估与调控关键技术研究进展 [J].水利学报,2016,47(3):398-412. (JIN Juliang,SONG Zhanzhi,CUI Yi,et al. Research progress on the key technologies of drought risk assessment and control [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016,47(3):398-412. (in Chinese))
- [16] 王莺, 沙莎, 王素萍等. 中国南方干旱灾害风险评估 [J]. 草业学报, 2015, 24(5):12-24. (WANG Ying,SHA Sha ,WANG Suping,et al.Assessment of drought disaster risk in southern China[J].Acta Prataculture Sinica, 2015, 24(5):12-24. (in Chinese))
- [17] 杜云.淮河流域农业干旱灾害风险评估研究[D].合肥:合肥工业大学, 2013. (DU Yun. Study on Risk Assessment of Agricultural Drought Disaster in Huaihe River Basin[D].Hefei:Hefei University of Technology, 2013. (in Chinese))

Assessment Method Based on Fuzzy Theory and Set Pair Analysis and Its Application to Agricultural Drought Disaster Risk Evaluation

LIANG Shuqi¹, WANG Wensheng¹, JIN Juliang²

(1. School of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Agricultural drought disaster risk assessment is one of the most important basic researches on the quantitative understanding of the mechanism of drought risk and scientific control of drought risk. Assessment method based on fuzzy theory and set pair analysis can take the multi-scale feature of information and fuzzy property of assessment criteria into full account. The presented method is simple in concept and convenient to calculate. Both agricultural drought risk assessment system and evaluation indexes are constituted by the hazard subsystem, exposure subsystem, damage sensitivity subsystem and drought resistance capacity subsystem. The assessment method is firstly applied to the agricultural drought disaster risk assessment. The results show that the presented method is satisfactory and it will provide a new approach for the evaluation of agricultural drought disaster risk.

Key words: agricultural drought disaster; risk assessment; assessment method based on fuzzy theory and set pair analysis

(上接第 59 页)

space spatial correlation. Taking the central area of Jiangning district in Nanjing as an example, a modified successive random additional method (SRA) was used to generate a random field with fractional Levy motion statistics for the logarithm of hydraulic conductivity ($\ln K$), and the possible non-homogeneous spatial distribution of the hydraulic conductivity was simulated, and the DRASTIC method was used to evaluate groundwater vulnerability. The results show that the degree of change in the hydraulic conductivity field generated by SRA is more severe than that of the conventional ordinary Kriging method, and it is more in line with the characteristics of complex distributed non-stationary random fields. The groundwater vulnerability assessment established on this basis is more in line with objective facts, which enriches and develops theories and methods in using stochastic theory to solve groundwater environmental problems.

Key words: groundwater vulnerability assessment; aquifer heterogeneity; random theory; hydraulic conductivity