

基于地统计学的宝鸡市区地下水位空间变异特征研究

许义和, 魏晓妹, 蔡明科, 胡国杰, 徐万林

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:借助地理信息系统软件(ArcGIS),从宝鸡市 DEM 数据中提取面积约 100 km² 的研究区图层,选取 24 眼监测井 1990 年、1995 年、2000 年和 2004 年的地下水位数据为样本资料,应用地统计学方法对市区地下水位进行了趋势分析、空间变异分析以及空间插值研究。结果表明,在单个年份中,市区地下水位在南北方向上存在明显的“U”型趋势,东西方向上的趋势变化稍显平稳;地下水位具有中等的空间相关性,在 800 m 以下尺度上的短距离变异所占比重大,各年份地下水的空间连续性差,空间自相关距离较短,异性比从 1990 年的 0.713 减小到 2004 年的 0.171,说明市区地下水位空间各向异性逐渐增强;球状模型交叉验证表明模型拟合效果良好,空间插值结果显示,研究区不同地方的地下水位年际变幅较大,且空间分布变化明显,主要受开采强度时空变化的影响。

关键词:宝鸡市区; 地统计学; 地下水位; 时空变异; ArcGIS

中图分类号: P641

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)01-0210-05

Geostatistics-based Study of Spatial Variability of Groundwater Level in Baoji Urban Area

XU Yi-he, WEI Xiao-mei, CAI Ming-ke, HU Guo-jie, XU Wan-lin

(College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Using geographic information system software (ArcGIS), extracting a layer of the study area about 100 km² from the DEM data of Baoji city, selecting the groundwater level data of 24 monitoring wells in the year of 1990, 1995, 2000 and 2004 as the sample data, this paper made a research on the trend analysis, spatial variation analysis and spatial interpolation of the urban area groundwater level with geostatistics. The results showed that there was a clear ‘U’ type trend in the north-south direction for the urban groundwater level, while the trend was not obvious in the east-west direction each year. Groundwater level was of moderate spatial correlation, more variation ingredients of the following scales in the 800 m short-range, poor spatial continuity each year and of short distance spatial autocorrelation. Anisotropy decreased from 0.713 in 1990 to 0.171 in 2004, which indicated a gradual increase of urban groundwater level spatial anisotropy. The cross validation of the spherical model turned to be good and the spatial interpolation showed that groundwater level and spatial distribution changed significantly between years in different parts of the study area as a result of the spatial-temporal exploitation intensity

Key words: Baoji rural area; geostatistics; groundwater level; spatial-temporal variability; ArcGIS

地下水是我国北方城市重要的供水水源,研究地下水的时空变异特征,对合理调控与管理地下水资源、保障城市用水安全具有重要的意义^[1]。目前,国内有关地下水时空变异特征的研究较多,但大多数集中在地下水水质方面^[2-6],采用地统计学方法对地下水水位进行时空变异特征的研究还尚不多见。宝鸡

市位于关中平原的西部,是陕西省第二大工业城市,市区地下水开采历史悠久。2000 年初,市区普查登记水源井 503 眼,地下水开采量达 6 984 万 m³,占城市总供水量的 66%,超采 1 106 万 m³。长期超采使市区地下水位大幅度下降、形成区域性降落漏斗,在集中开采地段导致浅层承压含水层被局部疏干。为

了合理开发利用地下水资源,保护生态环境,宝鸡市政府决定从 2001 年起逐年关闭一定数量的单位自备井,以控制市区地下水开采量。到 2004 年,自备井关闭数量已达 80 眼。同年 10 月,利用渭河市区段修筑的拦河闸开始蓄水,形成了总面积约 140 万 m^2 市区湖泊,既创造了优美的市区水域景观,又涵养了地下水源。本文基于宝鸡市 DEM 数据,利用 ArcGIS 软件,确定研究区范围,通过野外调查、资料收集,运用地统计学方法对宝鸡市区自备井关闭前后的地下水位时空变异规律及其特征进行研究,旨在为宝鸡市区地下水资源的保护及可持续利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本次研究区范围包括宝鸡市区建成区,面积约 100 km^2 。市区北临黄土台塬,南依秦岭山脉,西为群山所阻,东去进入宽阔的关中平原,呈西高东低、长条状分布在渭河两岸的高漫滩和一级阶地之上。市区主要的地貌单元是河谷阶地,另外还分布有冲洪积扇和滑坡堆积单元。市区地下水比较丰富,按地下水埋藏条件和含水介质特征分为第四系松散岩类孔隙潜水和第三系碎屑岩类孔隙裂隙承压水。市区多年平均降水量为 673.1 mm,其 50%~60% 集中在 7—9 月份。区内水系密布,渭河横贯全区,近些年由于降水量偏小兼宝鸡峡引渭河水用于灌溉,渭河经常发生断流。区内渭河两侧有大小支流 9 条,除清姜河、金陵河外,其他河流降水后多呈短暂洪水排入渭河,对地下水补给有限。

1.2 数据处理

1.2.1 分离研究区 DEM 数据 本文的地理信息资料来源于互联网——国际科学数据服务平台,选用 ASTER GDEM30 m 分辨率数字高程数据。软件工具采用 ArcGIS 9.3 以及 Excel 2003。由于原始数据覆盖区域远大于研究区,需借助 ArcGIS 平台,剪切出包含研究区的 DEM 数据(见图 1)。

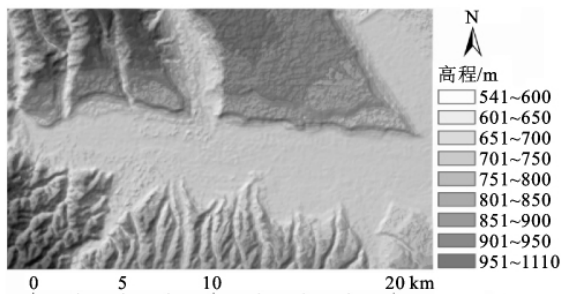


图 1 研究区 DEM

1.2.2 生成矢量研究图层 通过提取等高线操作,

形成研究区矢量图层。利用水文分析模块,提取并分离研究区范围内渭河及其主要支流图层。地下水监测井图层依据宝鸡市区 24 眼监测井 1990 年、1995 年、2000 年以及 2004 年的逐年地下水位埋深和各井的测点高程以及经纬度等数据建立。建立该点图层时,将监测井的多个属性数据首先保存为 Excel 文件,然后在 ArcGIS 软件中利用其经纬度将 Excel 文件转换为点图层。导入研究区和渭河图层,通过投影变换,使其与监测井的投影相一致。

依据市区地下水开采现状调查,已形成包括姜潭水源地、福临堡水源地、市区水源地、石坝河水源地、八里桥水源地、十里铺水源地、下马营水源地和卧龙寺等 8 个水源地在内的地下水集中开采区。市区水源地及地下水监测井空间分布如图 2 所示。

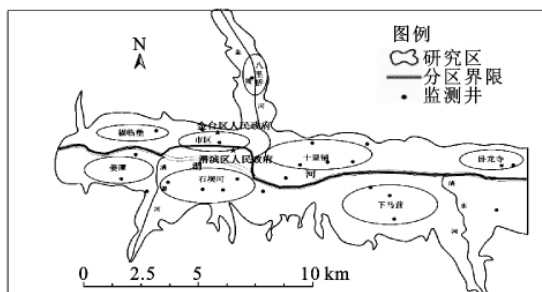


图 2 市区水源地及监测井分布图

1.3 研究方法

由于研究区范围较大,地下水动态监测井数目又相对较少,且分布不均。在这种情况下,要得到整个研究区的地下水位空间分布,必须要进行插值^[7]。本文选用克里金法(Kriging)对宝鸡市区地下水位进行插值。Kriging 方法用下面的方程描述一个区域化变量 $z(x)$ ^[8],即

$$z(x) = u(x) + \epsilon(x) \quad (1)$$

式中: $u(x)$ ——确定性的全局趋势分量。 $\epsilon(x)$ ——自相关随机的分量,Kriging 方法假定该分量具有均值为 0,满足二阶平稳假定的性质,它是通过变异函数进行描述。

变异函数是地统计学的基本工具,为区域变量 $z(x_i)$ 和 $z(x_i+h)$ 增量平方的数学期望,即区域化变量的方差,其通式为

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

式中: $\gamma(h)$ ——变异函数; h ——步长,即为了减少各样点组合对的空间距离个数而对其进行分类的样点空间间隔距离; $N(h)$ ——间隔距离为 h 时的样点对数; $z(x_i)$ ——变量 z 在空间位置 x_i 的取值; $z(x_i+h)$ ——变量 z 在空间位置 x_i+h 上的取值。

在本研究中步长的划分以 800 m 为间距,即

800, 1 600, ..., 8 000 m, 共 10 组组距; 8 000 m 小于样本距离 (17 km) 的一半, 符合地统计分析要求。在后续模型模拟过程中, 综合考虑曲线拟合情况、误差大小等因素, 对步长予以修正。进行 Kriging 插值的最关键一步在于确定变量的变异函数。通过对不同模型的运行比较表明, 宝鸡市区地下水位的实际变异函数值与球状模型 (spherical model, 公式 3) 的拟合效果较好, 该模型的一般公式为

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0 + C \left[\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\gamma(h)$ 、 h 含义同式 2; C_0 ——块金值, 反映数据点的测量误差; $C_0 + C$ ——基台值; a ——相关距离, 当数据点之间的距离大于 a 时, 则认为其是不相关的。

式 (3) 为各向同性时球状模型表达式, 由于区域化变量往往具有各向异性, 既存在几何各向异性又存在区域各向异性^[8], 因此, 还需确定异性比 ρ 和方向角 θ , 前者定义为变程椭圆短轴与长轴之比, 后者定

义为长轴与 y 轴 (或 x 轴) 的夹角, 顺时针方向为正。

本文运用上述地质统计学方法, 借助 ArcGIS 的地统计分析模块 (Geostatistical Analyst), 通过检验数据正态性、剔除数据趋势、拟合球状变异曲线以及交叉验证等步骤, 得到宝鸡市区各年地下水位动态插值结果, 据此分析市区地下水位的空间变异特征。

2 结果与分析

2.1 地下水位的趋势性分析

变异函数的计算, 首先要求数据符合正态分布, 否则可能存在比例效应^[9]。单样本柯尔莫哥洛夫·斯米诺夫 (One-sample Kolmogorov-Smirnov (KS)) 检验表明, 1990 年、1995 年、2000 年和 2004 年的地下水位数据符合正态分布; 其次, 要求区域变量满足二阶平稳假设^[10], 然而地下水位多是非平稳的, 因此需分离出其趋势性分量, 使数据具有较好的正态性, 更好地满足二阶平稳假定。在 ArcGIS 地统计分析模块中, 将 4 个年份的数据分别向 2 个正交方向投影, 以此来分析地下水位整体变化趋势, 如图 3 所示。

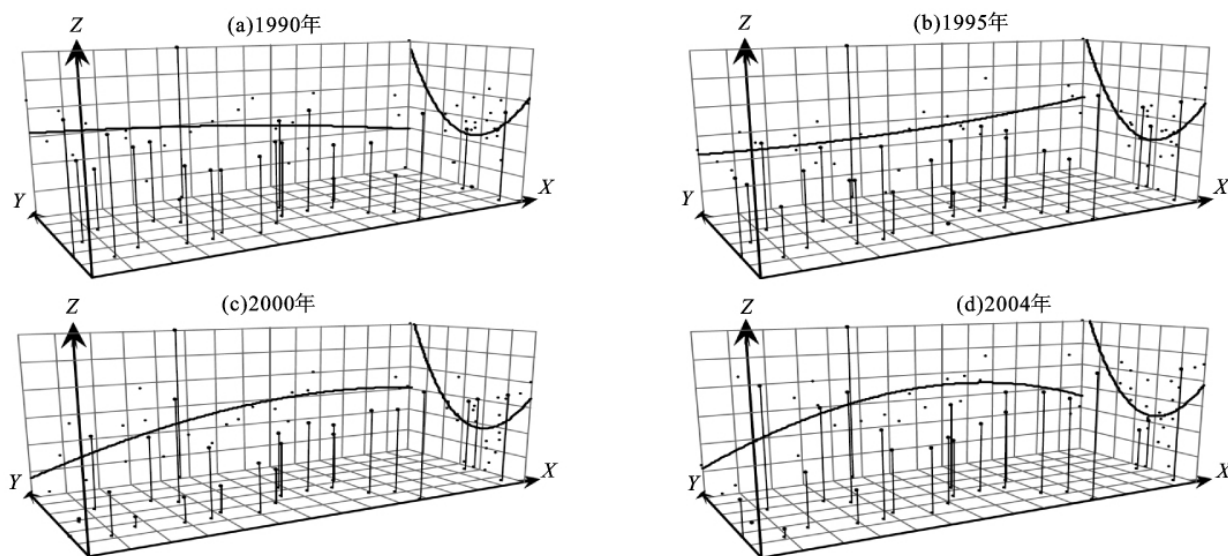


图 3 地下水位变化趋势

从图 3 中可看出, 在各个年份中, 市区地下水位在 y 方向 (南北方向) 上均呈现明显的“U”型趋势, 这与研究区的地形地貌较为一致, 研究区北边是渭北黄土台塬, 南边是秦岭山脉, 中间是地势较低的渭河漫滩及一级阶地, 因此呈现南北高、中间低的“U”型态势。在 x 方向上 (西东方向), 即沿着渭河水流方向, 相对当年 y 方向来说, 地下水位的趋势变化稍显平稳。整体上可以选择一个二阶多项式对地下水位变化趋势进行较好的模拟。

1990—2004 年, 南北方向上的地下水位变化趋

势基本没有发生改变, 而在西东方向上则发生了变化, 1990 年地下水位西高东低, 2000 年转变为东高西低, 2004 年形成了东西两头低, 中间高的趋势。这种变化趋势与宝鸡市区地形地貌、不同时期地下水开采强度及人工湖建成蓄水等因素有关。1990—2000 年, 宝鸡市区地下水开采主要集中在西边的姜潭水源地、石坝河水源地、市区水源地以及中部的下马营水源地, 东边的水源地开采强度相对较小。10 a 开采使得研究区地下水流向发生了改变, 这种改变主要表现在东西方向上, 地下水由南北汇流、单一向东的天然

流向转变为以下马营水源地东部为界,东西部流向相反的局面,在中西部地下水汇流至各个水源地由于超采形成的漏斗区,在东部则顺渭河而下,与地表水流向一致。2000—2004 年,在宝鸡市区中部,由于关闭自备井措施得力,加上人工湖蓄水对地下水产生补

给,使地下水位上升速度较东西两侧快。

2.2 空间变异特征分析

利用二次漂移假定将趋势性去掉后,采用各向异性球状模型对研究区 4 个年份的地下水位变异函数进行拟合,拟合后的模型参数见表 1。

表 1 各年份球状模型参数表

年份	块金值	基台值	块金系数/%	长轴变程/m	短轴变程/m	长轴所在角度	短轴变程/长轴变程
1990	38.40	61.74	62.20	5954	4244	321	0.713
1995	48.88	113.66	43.01	5954	1689	310	0.284
2000	41.48	32.12	56.36	4680	1901	278	0.406
2004	8.71	20.60	42.28	5723	977	320	0.171

块金值代表随机变异量,较大的块金值表明较小尺度上的某种过程不可忽视。基台值代表变量空间变异的结构性方差,其值越大表示总的空间异质程度越高。当不同的区域化变量相比较时,块金值和基台值并不十分有效,用块金值与基台值之比(块金系数)来反映块金方差占总空间异质性变异的大小则非常意义^[9,11]。块金值与基台值的比值小于 0.25 时,空间相关性强;在 0.25~0.75 之间时,空间相关性中等;大于 0.75 时,空间相关性弱^[12]。表 1 中地下水位的块金值与基台值的比值都在 0.25~0.75 之间,表明具有中等的空间相关性;各年的块金值均为正值,且值较大,说明存在由采样误差、短距离变异、随机变异等因素引起的块金效应,而且在 800 m 以下尺度上的短距离变异所占比重较大。

变程反映了在该搜索方向上的空间相关程度^[12],它与观测尺度以及在取样尺度上影响地下水特征的各种生态过程相互作用有关^[9]。在变程之内,变量具有空间自相关特性,反之不存在。表 1 中各年份模型长轴变程在 5~6 km,小于研究区域的尺度,说明研究区各年份地下水的空间连续性差,地下水位的空间自相关距离较短;异性比(短长轴变程之比)从 1990 年的 0.713 减小到 2004 年的 0.171,表明市区地下水位空间各向异性逐渐增强。长轴所在角度与渭河走向基本一致,反映出西东方向上地下水位呈现较长的相关尺度;而短轴所在角度与渭河大约呈垂直方向,表明地下水沿南北方向向渭河排泄。

2.3 地下水位空间插值结果及模型交叉验证

研究区地下水位空间插值最终结果如图 4 所示。插值过程中充分考虑地下水位的趋势性和各向异性,并利用模型交叉验证对插值结果进行评价。模型交叉验证统计值见表 2。一般来说,模型拟合良好的判别原则为^[12]:实测样本数据和估计值之间平均误差

绝对值接近 0,平均标准误差接近 0,平均预测标准差与均方根误差最接近,以及标准化均方根预测误差接近 1。因此,各年份的模型拟合结果较为理想。

从插值结果(图 4)来看,南北方向上地下水位是两头高中间低,并且地下水流都以近似垂直的角度流向中部,与地形吻合;东西方向上因地形地貌、开采强度等的空间差异,地下水位由西高东低逐渐转变为东西两头低,中间高,水流方向亦随之改变。从整体上来看,市区地下水位的空间插值结果与地下水位变化趋势分析是一致的。图 4 显示,1990 年研究区最低地下水位是 522 m,1995 年下降到 492 m,到 2000 年上升为 502 m,2004 年则继续上升到 533 m,最低水位分布区域由最东部逐渐转移到最西部,说明 14 a 间市区不同地方地下水位变幅较大,且空间分布变化明显。地下水位的变化受开采强度的影响较大,地下水资源的采补难以保持平衡。根据统计数据分析,1990—1995 年,开采系数持续增大且大于 1 的水源地有福临堡水源地、市区水源地和石坝河水源地,超强度开采使得三水源地部分低水位区域相连,并形成了降落漏斗。姜潭水源地和十里铺水源地持续强开采则形成了次一级低水位区域,从整体上看,市区地下水处于严重超采状态;到 2000 年,虽然姜潭水源地、石坝河水源地以及卧龙寺水源地仍处在强开采或超强开采的状态,但由于其他水源地开采强度已大幅度消减,地下水补给大于开采,市区地下水处于强开采状态。2000 年后,随着市区自备井逐年关闭,地下水开采量也在逐年减小,到 2004 年,地下水开采量仅为 4 712.4 万 m³,较 1990 年减少了 36.2%,这使得市区整体地下水位迅速回升,地下水位最低值由 2000 年的 502 m 上升到 2004 年的 533 m,上升幅度达 30 m,地下水补给继续大于开采,市区地下水处于中等开采强度。

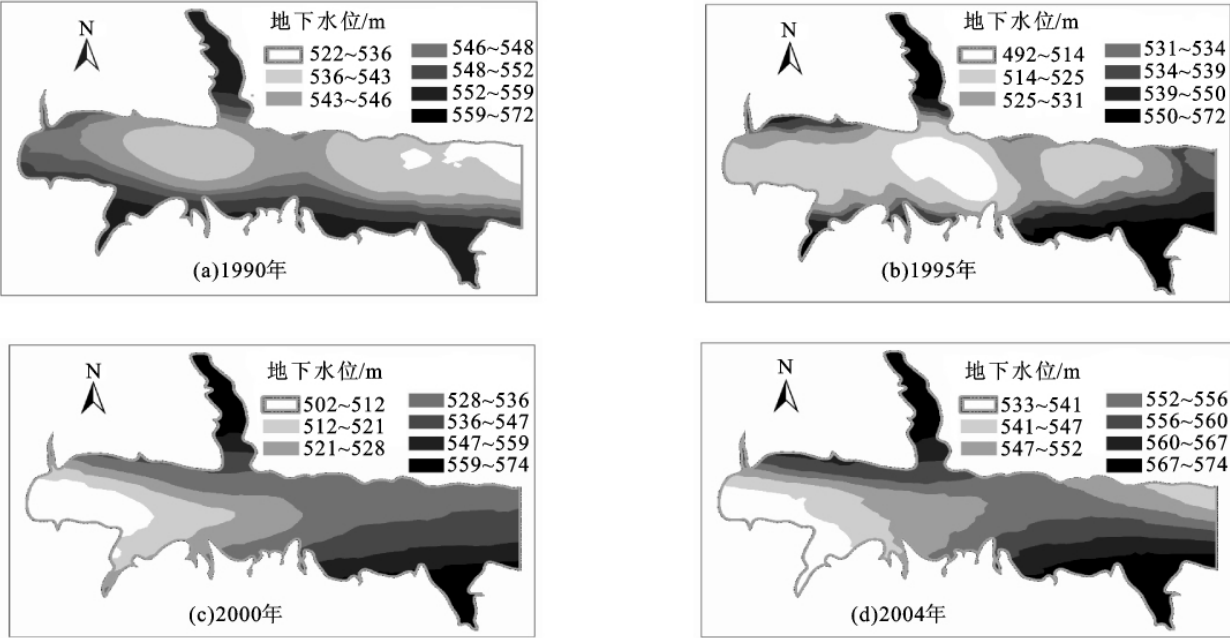


图 4 插值结果

综上所述,宝鸡市区地下水位在短时期内呈现出较为剧烈的波动既受制于区域特殊的地形及地质条件,同时又与市区地下水的补排条件变化密切相关。

表 2 模型交叉验证统计值

年份	平均 误差	均方根 误差	平均预测 标准差	平均 标准差	标准均方根 预测误差
1990	-0.1080	11.14	9.655	-0.04400	1.090
1995	0.1490	14.81	11.440	0.10320	1.164
2000	0.0789	10.52	8.572	0.08331	1.122
2004	0.0825	6.94	5.037	0.06970	1.114

3 结 论

(1)各年份球状模型拟合的块金值与基台值的比值都在 0.25~0.75 之间,因此宝鸡市区地下水位具有中等的空间相关性。各年份的块金值均为正值,且值较大,说明在 800 m 以下尺度上的短距离变异所占比重较大。各年份模型长轴变程小于研究区域的尺度,说明研究区各年份地下水的空间连续性差,地下水位的空间自相关距离较短。异性比(短长轴变程之比)从 1990 年的 0.713 减小到 2004 年的 0.171,说明研究区地下水位空间各向异性逐渐增强。

(2)交叉验证显示各年份的模型拟合结果较为理想。插值结果表明,市区不同地方的地下水位变幅较大,且空间分布变化明显,说明研究区局部地下水位变化受开采强度变化的影响较大。

参考文献:

[1] 李新波,郝晋珉,胡克林,等.集约化农业生产区浅层地

下水埋深的时空变异规律[J]. 农业工程学报,2008,24(4):95-98.

[2] 米日姑·买买提,海米提·依米提,古丽娜尔·托合提,等.伊犁河流域地下水埋深与 TDS 时空变异及水化学特征分析[J]. 水土保持学报,2010,24(2):174-178.

[3] 陈淑峰,李帷,胡克林,等.基于 GIS 的华北高产粮区地下水硝态氮含量时空变异特征[J]. 环境科学,2009,30(12):3541-3547.

[4] 贾艳红,赵传燕,南忠仁.黑河下游地下水波动带土壤盐份空间变异性研究[J]. 土壤学报,2008,45(3):420-430.

[5] 姚荣江,杨劲松,刘广明.土壤盐分和含水量的空间变异性及其 CoKriging 估值:以黄河三角洲地区典型地块为例[J]. 水土保持学报,2006,20(5):133-138.

[6] 苏里坦,宋郁东,张展翔.新疆三河流域地下水矿化度的时空变异及其分形特征[J]. 地质科技情报,2005,24(1):85-90.

[7] 李新,程国栋,卢玲.空间内插方法比较[J]. 地球科学进展,2000,15(3):260-295.

[8] 曹洪,骆冠勇,廖建三,等.广州城区地下空间开发对地下水环境的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(2):3347-3356.

[9] 肖笃宁,李小玉,宋冬梅,等.民勤绿洲地下水开采时空动态模拟[J]. 中国科学,2006,36(6):567-578.

[10] 王仁铎,胡光道.线性地质统计学[M]. 北京:地质出版社,1988.

[11] 韩业珍,魏晓妹,李立.基于地统计学的地下水位时空变异特征研究[J]. 人民黄河,2010,32(5):52-53.

[12] 阮本清,许凤冉,蒋任飞.基于球状模型参数的地下水水位空间变异特性及其演化规律分析[J]. 水利学报,2008,39(5):573-579.