

地下水空间特征自动化提取方法研究

潘云 官辉力 李小娟 赵文吉

(首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100037)

(首都师范大学资源环境与GIS北京市重点实验室, 北京 100037)

摘要 本文在地下水水位栅格数据模型的基础上,根据地下水汇流方向、地下水降落漏斗以及地下分水岭的水文地质学含义,首先结合栅格数据的特点建立它们的数学模型,然后运用种子算法、数学形态学方法设计了自动化提取算法,并对所提取的结果进行了可视化表达。最后以苏锡常地区为例,通过对提取结果的分析,提出了该地区地下水开采应注意的一些问题。该方法有助于更好地认识地下水时空变化规律,为地下水资源管理提供辅助决策支持,同时也是数字化地下水研究的有益探索。

关键词 地下水 空间特征 种子算法 数学形态学 可视化

中图分类号: TV211.1*2 TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)08-1489-06

Study on Automated Extraction of Groundwater Spatial Characteristics

PAN Yun, GONG Hui-li, LI Xiao-juan, ZHAO Wen-ji

(Key Laboratory of 3-D Information Acquisition and Application, MOE, Beijing 100037)

(The Key Laboratory of Resource Environment and GIS of Beijing, Capital Normal University, Beijing 100037)

Abstract Based on the characteristics of the groundwater table raster model, this paper firstly builds up the mathematical models about the groundwater flow direction, the cone of the depression and groundwater divides according to their hydrogeological definition. And then, seed algorithm and mathematical morphology are used to extract these spatial characteristics, and also the extracted information is visualized. In the end, this paper takes Su-Xi-Chang area as a study site, analyzes the extracted and visualized spatial characteristics, and gives some suggestion on the rational groundwater exploiting. These automated extraction results could facilitate the analysis of temporal and spatial dynamics of groundwater, provides support for groundwater management, and it also could be the useful exploring for digital groundwater study.

Keywords groundwater, spatial characteristics, seed algorithm, mathematical morphology, visualization

1 引言

随着人类对地下水资源的不断开发利用,地下水的空间分布形态、变化规律受到人为的影响越来越严重,造成了地面沉降、地裂缝等一系列环境地质灾害。丰富、准确、可视的地下水空间信息有助于更好地了解地下水动态特征,进行合理的地下水资源开发。

随着数字高程模型(DEM)的提出与发展,基于DEM(尤其是规则格网表示模型)的有关信息提取、

分析算法日益丰富、成熟,开展了坡度坡向、山坡阴影以及山脊线、谷底线等地形特征和地表水文特征的提取研究^[1-7]。与此同时,地下水空间特征自动化提取的研究却还比较缺乏,地下水流向、地下水降落漏斗、地下分水岭等表征地下水分布规律的特征信息往往隐含在地下水位的空间分布中,不利于时空尺度的比较分析。

本文尝试从有关地下水空间特征的水文地质学含义出发,结合栅格数据模型的特点,从水位数据中自动化地提取出地下水流向、地下水降落漏斗以及地下分水岭的提取与表达。

基金项目:国家自然科学基金项目(40571125)

收稿日期:2007-03-28;改回日期:2007-04-28

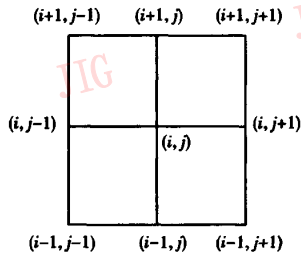
第一作者简介:潘云(1980~),男,主要研究方向为地下水三维可视化、生态水文。E-mail: ysyk2997@163.com

2 地下水空间特征提取算法

为了进行地下水空间特征提取,首先需要能够便于计算分析的水位模型。通过离散的观测井空间插值就可以生成一个栅格数据模型^[8-10]。该模型和数字高程模型(DEM)有着相同的结构,只不过此处的高程表示的是地下水水位。在此基础上,根据有关水文地质学基本理论、概念,进行以下信息的提取与表达。

(1) 汇流方向

为了更清楚地表现地下水在人工开采条件下的汇流方向变化,利用带箭头的线段表示水流方向。在一个 2×2 的窗口中(图 1(a)),先根据



(a) 计算单元

$$\max \left(\frac{|Z(k, m) - Z(i, j)|}{\sqrt{(X_k - X_i)^2 + (Y_m - Y_j)^2}} \right)$$

$$(i - 1 \leq k \leq i + 1, j - 1 \leq m \leq j + 1)$$

得到与中心点水力坡度最大的另一点,其中, X, Y, Z 分别表示相应点的横、纵坐标与水位值。然后比较两者水位高低确定箭头的起点 $O_1(x_1, y_1)$ 和终点 $O_2(x_2, y_2)$, 并根据

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

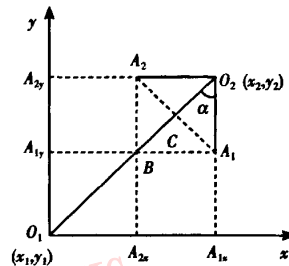
$$A_{1x} = x_1 + d \sin(\alpha)$$

$$A_{1y} = y_1 + d \cos(\alpha)$$

$$A_{2x} = x_2 + d \sin(\alpha)$$

$$A_{2y} = y_2 + d \cos(\alpha)$$

计算出箭头 A_1, A_2 点的位置(图 1(b))。



(b) 箭头位置

图 1 地下水汇流方向计算

Fig. 1 Groundwater flow direction calculation

(2) 降落漏斗

地下水降落漏斗反映了该区域的地下水长期处于过量开采状况。单井抽水的地下水降落漏斗概念模型可以如图 2 表示,结合降落漏斗的传统定义^[11],建立它的数学模型为

$$\forall P, \text{若} \begin{cases} ① Q \in D \\ ② R \notin D \\ ③ P \text{ 与 } Q, R \text{ 相邻} \\ ④ Z_P > Z_Q \\ ⑤ Z_P \leq Z_R \end{cases}$$

则 $P \in D$

其中, P, Q, R 为网格上点, D 为降落漏斗点的集合, Z_P 指 P 点的水位值。根据该数学模型,运用种子算法^[12-14],把漏斗中心点定为第 1 个种子点,然后八方向搜索,把满足漏斗条件的栅格点也作为种子点存到种子数组里,并把判断过的点作上标记,然后把当前种子点存到漏斗数组里,并从种子数组里删除

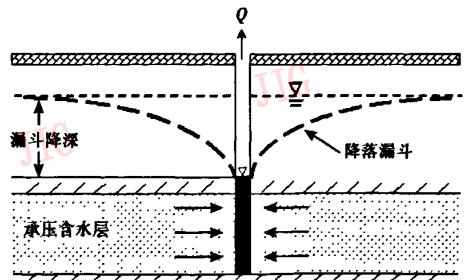


图 2 单井抽水的降落漏斗概念模型

Fig. 2 Conceptual mode for cone of depression

掉。如此反复进行,直到种子数组为空,具体算法流程如图 3 所示。

(3) 地下分水岭

地下分水岭指地下水水面分水岭的连线,其两边的地下水流向不同的汇水区域,它的概念模型可以如图 4 表示。

数学形态学是一门建立在集论基础上的学科,是几何形态学分析和描述的有力工具。近年来,它在边缘检测、特征提取、形状识别、图像分割等方面获得了广泛的应用^[15-18]。利用数学形态学提取地

下水分水岭的关键在于设计一种能够反映分水岭特点的结构元素,然后以合适的形态学运算把这些点提取出来。具体流程如图 5 所示。

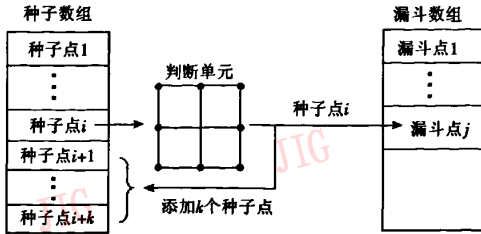


图 3 种子算法提取降落漏斗的图解

Fig. 3 Seed fill algorithm process

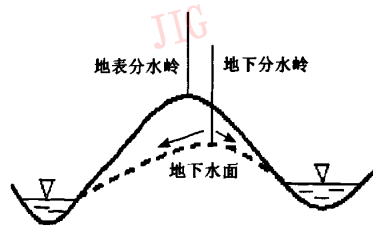


图 4 地下分水岭概念模型

Fig. 4 Conceptual model of groundwater divide

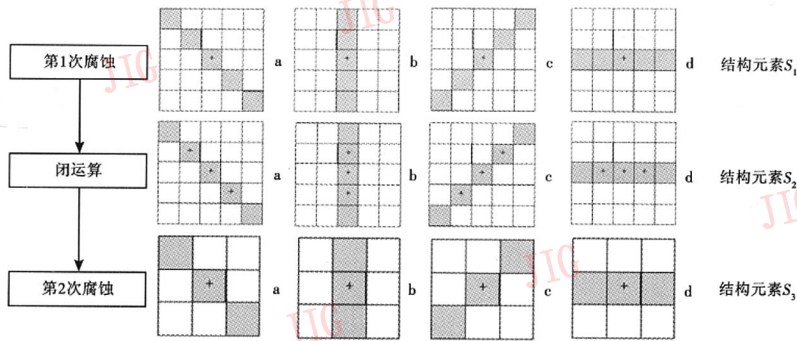


图 5 地下分水岭提取的数学形态学方法

Fig. 5 Mathematical morphology processing for groundwater divide extraction

在结构元素 S_1 、 S_2 和 S_3 中,带“+”的是焦点,两边的水位沿相反的方向逐步降低。在同类的 a、b、c 和 d 中,只要满足其中一种即认为该点满足该类结构元素。 S_2 的 3 个焦点是为了更好地反映分水岭的线性特征,排除一些非分水岭点的干扰。

3 提取结果的可视化

选择 Visual C++ 6.0 和 OpenGL (Open Graphics Lib) 作为算法实现以及可视化开发的工具。OpenGL 是近几年发展起来的一个性能卓越的 3 维图形标准,它是在 SGI 等多家世界闻名的计算机公司的倡导下,以 SGI 的 GL 3 维图形库为基础制定的一个通用共享的开放式 3 维图形标准。

根据地下水格网结构,为了便于更细致地表现水位变化,将每个网格对角线连接,分为两个三角

形。然后利用 glBegin (GLenum mode) 选择绘制的模式,可以进行 GL_POINTS 下的点绘制,也可以进行 GL_LINE_STRIP 下的线绘制,以及 GL_TRIANGLE_STRIP 下的面绘制。并可以通过 glColor () 设置模型颜色, glLightfv () 设置光照效果, glShadeModel () 进行明暗处理。此外,还可以通过投影变换、材质设置等增强可视化效果。

4 应用实例

苏州市、无锡市和常州市(简称苏锡常地区)位于长江下游地区,江苏省的南部,该地区因长期以来过量开采地下水,造成了严重的地面沉降、地裂缝灾害^[19,20]。在原始观测孔的基础上,利用克立格(Kriging)插值方法,建立第 I、II 承压水从 1995 年到 2000 年各月平均水位的栅格模型,然后利用

上述方法提取地下水流向、地下水降落漏斗以及地下分水岭,并进行可视化表达,结果如图 6 ~ 图 8 所示。

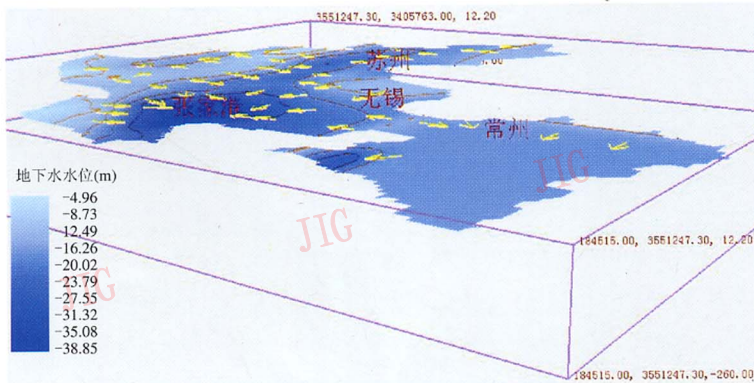
从以上结果可以看出,苏锡常地区第 I 和第 II 承压水都出现了降落漏斗。空间上表现为第 I 承压水降落漏斗以张家港市为中心,漏斗中心水位 -40m 左右;第 II 承压水降落漏斗以常州-无锡为中心,漏斗中心水位 -80m 左右。时间上表现为第 II 承压水降落漏斗中心水位持续下降,并且有向张家港市和苏州市扩张的趋势。整个第 II 承压含水层大致存在着 4 个汇水区域:(1)常州、无锡之间,这是整个含水层最大的汇水区域;(2)以常熟市为中心;(3)以苏州市为中心;(4)以昆山市为中心。这几个汇水区域都以城市为中心,或分布在城市周围,这是因为城市工业、生活用水量,对地下水的开采量也

大。同时,在常州、无锡与张家港之间存在一个东南-西北走向的分水岭,但有着减弱的趋势,这使得张家港市的第 II 承压水将越来越多地补给常州、无锡地区。

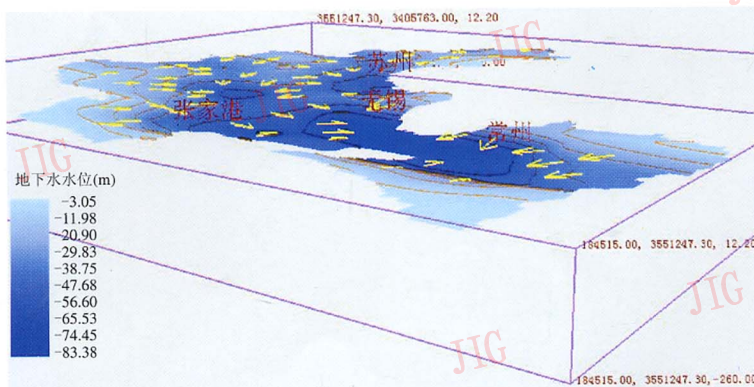
造成这一现象的主要原因在于该地区地下水长期以来处于超采状态,尤其是作为主开采层的第 II 承压水。2000 年第 3 季度,张家港市第 I 承压水开采量为 140 593.7 m³/d,常州市第 II 承压水开采量为 123 605.7 m³/d。

通过以上分析认为,苏锡常地区地面沉降防治需要注意以下问题:

(1) 调整地下水开采层次。张家港地区应该停止或减少对第 I 承压水的开采,可以适当开采第 II 承压水;常州、无锡地区应该停止或减少对第 II 承压水的开采,可以适当开采第 I 承压水。



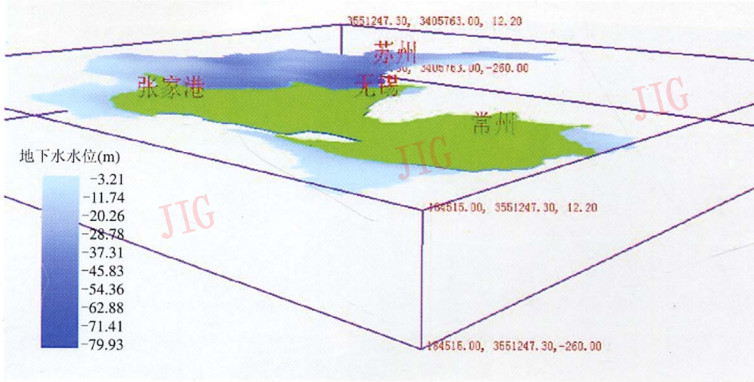
(a) 第 I 承压水 2000 年 7 月



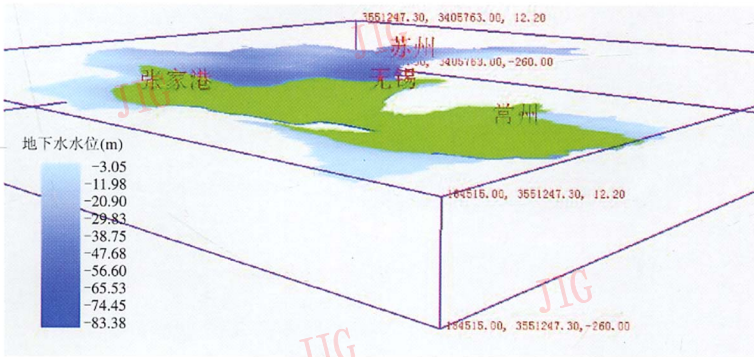
(b) 第 II 承压水 2000 年 7 月

图 6 第 I、II 承压水 2000 年 7 月水位空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of groundwater in confined aquifer I and II, July 2000



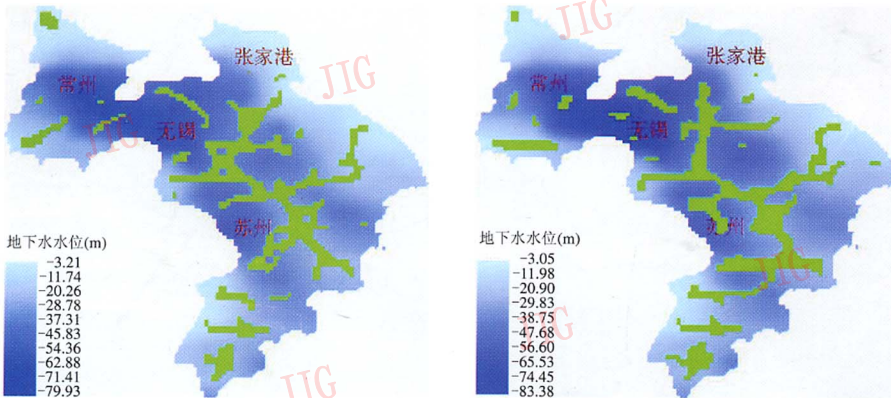
(a) 1995年7月



(b) 2000年7月

图 7 第 II 承压水降落漏斗变化

Fig.7 Cone of depression dynamics(confined aquifer II)



(a) 1995年7月

(b) 2000年7月

图 8 第 II 承压水地下水岭变化

Fig.8 Groundwater divide dynamics(confined aquifer II)

(2) 加强对城市边缘地区地下水下降的重视程度。随着各城市周围地下水分水岭的减弱,各降落漏斗有连成一片的趋势,在城市中心水位变化不大的情况下,城市周边水位仍持续下降,因此,需进一步认识、预防水位下降对城市周边生态环境的影响。

5 结 论

本文从地下水位数据中提取出了地下水流向、地下水降落漏斗以及地下分水岭,并把这些特征进行了可视化表达。在方法上,提出了一种根据地下水空间特征设计合理的数学模型、可视化模型的思想;在应用上,所提取的空间特征信息有助于更好地分析地下水时空变化规律,是数字地下水建设的有益探索。下一步,将在基于空间特征信息的空间统计方面作进一步的研究。

参考文献 (References)

- Zhu Qing, Zhao Jie, Zhong Zheng, *et al.* The extraction of topographic patterns based on regular grid DEMs [J]. *ACTA Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, 33(1): 77 ~ 82. [朱庆, 赵杰, 钟正等. 基于规则格网 DEM 的地形特征提取算法[J]. 测绘学报, 2004, 33(1): 77 ~ 82.]
- Chen Yong-liang, Liu Da-you, Yu Qiang-yuan. Automatic extraction of natural river system from DEM [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2002, 7(1): 91 ~ 96. [陈永良, 刘大有, 虞强源. 从 DEM 中自动提取自然水系[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(1): 91 ~ 96.]
- Ye Ai-zhong, Xia Jun, Wang Gang-sheng, *et al.* Drainage network extraction and subcatchment delineation based on digital elevation model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(5): 531 ~ 537. [叶爱中, 夏军, 王纲胜等. 基于数字高程模型的河网提取及子流域生成[J]. 水利学报, 2005, 36(5): 531 ~ 537.]
- Liu Ren-yi, Liu Nan. A new DEM-based method for flood area calculation and damage evaluation [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2001, 6(2): 118 ~ 122. [刘仁义, 刘南. 一种基于数字高程模型 DEM 的淹没区灾害评估方法[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(2): 118 ~ 122.]
- Nisar T R A, Gopal Rao K, Murthy J S R. Automatic extraction of tank outlets in a sub-watershed using digital elevation models [J]. *Agricultural Water Management*, 2002, (57): 1 ~ 10.
- Martz W L, Jurgen Garbrecht. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM [J]. *Computers & Geosciences*, 1999, (25): 835 ~ 844.
- Martz W L, Jurgen Garbrecht. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: A Review and a new method-comment [J]. *Journal of Hydrology*, 1995, (167): 393 ~ 396.
- Chen Jia-jun, Wang Hong-qi, Zhang Zheng, *et al.* Application of geostatistics to groundwater table interpolation [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1998, (6): 7 ~ 10. [陈家军, 王红旗, 张征等. 地质统计学方法在地下水水位估值中应用[J]. 水文地质工程地质, 1998, (6): 7 ~ 10.]
- Chen Jia-jun, Guo Qiao-yu, Wang Hong-qi, *et al.* The application of Co-universal kriging method for estimation of groundwater table [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, (7): 7 ~ 13. [陈家军, 郭乔羽, 王红旗等. 应用协同一泛克立格法估计地下水水位[J]. 水利学报, 2000, (7): 7 ~ 13.]
- Desbarats A J, Logan C E, Hinton M J, *et al.* On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, (255): 25 ~ 38.
- Xue Yu-qun. *Dynamics of Groundwater* [M]. Beijing: Geology Press, 1997: 9 ~ 11. [薛禹群主编. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 9 ~ 11.]
- Ding Zhi-xiong, Li Ji-ren, Li Lin. Method for flood submergence analysis based on GIS grid model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, (6): 56 ~ 60.
- Lin Feng, Soon S H. An effective 3D seed fill algorithm [J]. *Computer & Graphics*, 1998, 22(5): 641 ~ 644.
- Chantal R M, Peyrin F, Garrillon Y, *et al.* Automated 3D region growing algorithm based on an assessment function [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2002, (23): 137 ~ 150.
- An Ru, Fen Xue-zhi, Wang Hui-lin. Road feature extraction from remote sensing classified imagery based on mathematical morphology analysis of road networks [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(7): 798 ~ 804. [安如, 冯学智, 王慧麟. 基于数学形态学的道路遥感影像特征提取及网络分析[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(7): 798 ~ 804.]
- Lu Ya-qin, Wu Ling-chao. A method of license plate location based on morphology [J]. *Computer Engineering*, 2005, 31(3): 224 ~ 226. [卢雅琴, 邬凌超. 基于数学形态学的车牌定位方法[J]. 计算机工程, 2005, 31(3): 224 ~ 226.]
- Pedro Pina, Luis Ribeiro, Fernando Muge. A mathematical morphology contribution to study some aspects of hydrogeological systems [J]. *Computer & Geosciences*, 2001, (27): 1061 ~ 1069.
- Donat Demanet. Application and processing of geophysical images for mapping faults [J]. *Computers & Geosciences*, 2001, (27): 1031 ~ 1037.
- Xue Yu-qun. Studies on groundwater resources and land subsidence of Jiangsu [J]. *Jiangsu Geology*, 2001, 25(4): 193 ~ 195. [薛禹群. 地下水资源与江苏地面沉降研究[J]. 江苏地质, 2001, 25(4): 193 ~ 195.]
- Yu Jun. Preliminary design of establishment of land subsidence monitoring network system in Suzhou-Wuxi-Changzhou (Su-Xi-Chang) area [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard Control*, 2000, 11(3): 82 ~ 85. [于军. 苏锡常地区地面沉降监测网络体系建设初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(3): 82 ~ 85.]