

尖点突变模型在地下水特殊脆弱性评价中的应用

徐明峰¹, 李绪谦¹, 金春花², 刘昨非²

(1. 吉林大学环境与资源学院, 吉林 长春 130026 2. 长春市水资源管理办公室, 吉林 长春 130021)

摘要 根据长春城区半承压含水层的具体状况, 用突变理论进行脆弱性评价。将含水层厚度等 7 个评价因子划分为两个综合因子, 以这两个综合因子为控制变量建立地下水特殊脆弱性状态的尖点突变模型, 分析了脆弱性的突变特征, 对地下水特殊脆弱性进行评价, 绘制评价图, 为地下水资源的科学管理提供依据。

关键词 半承压含水层 特殊脆弱性 控制变量 尖点突变

中图分类号 P641.2 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2005)05-0019-04

Application of cusp catastrophe model to the groundwater specific vulnerability assessment

XU Ming-feng¹, LI Xu-qian¹, JIN Chun-hua², LIU Zuo-fei²

(1. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Water Resources Management Office of Changchun, Changchun 130021, China)

Abstract According to the specific conditions of semi-confined aquifer in the urban area of Changchun City, the catastrophe model was selected for vulnerability assessment. Seven evaluation indices, such as thickness of aquifer, etc., were classified into two comprehensive factors. A cusp catastrophe model for analyses of catastrophe characteristics of groundwater specific vulnerability was established based on the comprehensive factors. The specific vulnerability of groundwater was evaluated, and assessment chart was made, providing a basis for scientific management of groundwater resources.

Key words semi-confined aquifer; specific vulnerability; control variables; cusp catastrophe

地下水脆弱性是地下水系统的一个固有特性, 美国国家环保署和国际水文地质学家协会(IAH)给出地下水脆弱性如下定义: 地下水系统对人类和(或)自然的有效敏感性。同时, 将脆弱性分为固有(本质)脆弱性和特殊(综合)脆弱性。本质脆弱性, 即不考虑人类开采活动和污染源而只考虑水文地质内部因素的脆弱性; 它不考虑污染源或污染物的性质和类型, 是静态不可变和人为不可控制的。特殊脆弱性, 即地下水对某一特定污染源或人类活动的脆弱性。它与污染源和人类活动有关是动态、可变和人为可控制的^[1]。

长春市是东北地区重要的工业与文化城市, 全

国 50 个严重缺水城市之一^[2]。城市供水由石头口门水库、新立城水库及地下水提供, 水库主要供生活和工业用水。地下水作为长春城市供水水源之一, 已成为城市供水环节中的重要组成部分, 长春市城区的地下水开采历史较长, 地下水现状不容乐观, 人为影响导致地下含水系统发生了局部演化, 因此, 对长春城区地下水特殊脆弱性进行评价, 了解地下水开采对地下水环境的影响, 可以为该地区的地下水资源科学管理提供依据。

1 评价范围及地质构造

评价区域由北起小毛家窝堡, 经太平堡、小城

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973)(2004CB418505)

作者简介 徐明峰(1972—), 男, 吉林德惠人, 工程师, 硕士, 从事水资源管理工作。通过地址: 130021 长春市水资源管理办公室, E-mail: xmfmaster@eyou.com

子、冯家屯、苏家营子到合心镇一线 ;西由合心镇经东小良山、齐家洼子、白龙屯到大屯镇一线 ;南起大屯镇,经永春堡到范家桥一线 ;东起小毛家窝堡经兴隆山镇、三道镇、净月镇到范家桥一线所围成的闭合圈。面积为 567.2 km²。

伊通河及其支流为城市的主要地表水体。伊通河受上游新立城水库控制,除洪水期外,水库排放量很小,多用于农业灌溉,城区部分基本断流。

地下水含水层为第四系砂,砂砾石浅层含水岩组及白垩系基岩孔隙裂隙深层含水岩组。目前长春市的地下水水源地主要集中在白垩系含水层,因此把白垩系含水层作为本次特殊脆弱性评价的目的层。

评价含水层由下白垩系一套碎屑沉积岩,包括泉头组、青山口组、姚家组和嫩江组地层构成。其岩性为泥岩、粉砂岩、砂岩、泥质砂岩、含砾砂岩等。其中腰兴隆沟—人民广场—贾家洼子断裂带、赵家窝棚—四间房断裂带富水性好。泉头组三、四段和青山口组地层中粒度较粗,胶结较差孔隙裂隙发育富水性较好。在泉头组一、二段和嫩江、姚家组地层中,由于岩性变细,裂隙发育差,富水性很弱。

在第四系与白垩系地层之间的不整合面上为弱透水层,岩性为含砾的粉质亚黏土和裂隙被黏性土充填的基岩风化壳。由于白垩系含水层长期开采,沟通了弱透水层与其上下所有含水介质之间的水力联系,白垩系含水层为半承压含水层。

2 地下水特殊脆弱性评价方法

在国内外地下水脆弱性研究中,DRASTIC 方法应用最为广泛。DRASTIC 方法属于经验性方法,其评价模型为线性。确切地说,对复杂的含水层脆弱性评价而言,该方法只是一种评估方法,缺乏理论上的严谨性。含水层脆弱性评价指标的权重作为一个固定值,不尽合理。另外,用 DRASTIC 方法不能评价半承压含水层,只能将其划为承压或非承压含水层进行评价^[3],体现不出半承压含水层的脆弱性。DRASTIC 方法侧重地下水本质脆弱性,对人为影响因素没有考虑,不适用于地下水特殊脆弱性评价。

突变理论是 20 世纪 70 年代发展起来的一门新的数学学科,主要研究动态系统中的不连续现象,描述一系列连续性的量变如何演变成跳跃式质变的数学理论。它直接处理不连续性而不联系任何特殊的内在机制,这使它特别适用于对内部作用尚未知系统的研究。如果我们在一个系统中观察到已知的突变特征——突跳、滞后、双模态、不可达性和发散的一部或全部,则至少可以作为研究中的一种假设,我们可以认为对潜在的动力学是可以应用突变理论

的^[4]。突变论的证明涉及数学基础虽然较深(如拓扑学、奇点理论等),但其应用模型较简单,一般所讲的突变论实际上是初等突变理论。

初等突变论主要研究势函数,并根据势函数将临界点分类,进而研究临界点附近的不连续特征。势函数中的变量有两类 ①状态变量(行为变量),它表示系统的行为状态 ②控制变量,可把它视作影响行为状态的诸因素。当控制变量的数目不大于 4、状态变量的数目不超过 2 个时,只有 7 种突变类型。但常用的突变模型有折叠突变、尖点突变、燕尾突变、和蝴蝶突变^[5]几种形式(表 1)。

表 1 常用突变模型

模型名称	控制变量维数	状态变量维数	势 函 数
折叠突变	1	1	$V_a(x) = \frac{1}{3}x^3 + ax$
尖点突变	2	1	$V_{ab}(x) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ax^2 + bx$
燕尾突变	3	1	$V_{abc}(x) = \frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{3}ax^3 + \frac{1}{2}bx^2 + cx$
蝴蝶突变	4	1	$V_{abcd}(x) = \frac{1}{6}x^6 + \frac{1}{4}ax^4 + \frac{1}{3}bx^3 + \frac{1}{2}cx^2 + dx$

地下水特殊脆弱性由于牵涉到太多复杂因素,其内在作用机制尚未探明。一般按照地下水脆弱性的表现特征,即在特殊脆弱性中可以确定脆弱、不脆弱两种基本状态,即双模态 ;地下水系统受到开采或污染影响后很难恢复到原始天然状态,由不脆弱到脆弱和脆弱恢复到不脆弱是两个不同过程,即滞后。基于双模态、滞后这两个特征可以考虑在地下水特殊脆弱性评价中应用突变理论。地下水特殊脆弱性这个系统状态受控于含水层状况、人类开采活动两个主要控制变量,适用于尖点突变模型对其进行模拟。

2.1 评价因子

参考 DRASTIC 指标体系,选择如下评价因子。含水层上覆地层厚度 x_1 反映了含水层防护能力,含水层厚度 x_2 决定了地下水资源的蓄存能力,含水层渗透系数 x_3 反映含水层的主要特征,这三个因子来体现含水层对地下水特殊脆弱性的影响。地下水开采对地下水的主要影响,用开采强度 x_4 ,水位 x_5 ,漏斗面积 x_6 表现。人类活动首先对包气带产生影响,污染物在包气带渗入阶段以污染质本身的净化为主,只要污染物在土层中的残留量不超过环境容量,地下水就不会受到明显污染。因此将包气带土层被污染程度 x_7 (用土层中污染物累计量与土层环境容量比值表示)作为一项评价因子表示人类活动对地下水系统质量方面的影响。

本次对长春城区的白垩系含水层按照以上评价

因子和水源地范围分成 14 个评价区。5,6,7,9,12 评价区为腰兴隆沟—贾家洼子青山口组断裂带,8,14 评价区为白垩系嫩江组断裂带。1,3,4,10,13 评价区为白垩系泉头组含水层,2,11 评价区为白垩系姚家组含水层。表 2 中数据为长春城区地下水 2001 年的监测值。

表 2 评价区参数							
评价区	评价因子						
	x_1/m	x_2/m	$x_3/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	$x_4/(\text{m}^3\cdot(\text{d}\cdot\text{km}^2)^{-1})$	x_5/m	x_6/km^2	x_7
1	18.3	25.2	0.80	36	-12.2	9.0	0.76
2	25.2	19.6	0.36	292	-42.0	6.5	0.70
3	23.4	30.2	0.80	510	-24.8	4.0	0.58
4	25.8	30.5	0.76	182	-35.0	11.0	0.50
5	17.3	25.8	2.24	760	-22.3	10.5	0.69
6	22.6	29.0	2.10	773	-19.8	5.3	0.53
7	16.3	27.4	2.05	400	-2.5	5.0	0.66
8	19.7	26.9	0.47	192	-45.0	18.0	0.57
9	17.5	32.2	0.95	280	-35.7	8.5	0.60
10	18.3	35.6	0.74	230	-35.3	12.0	0.62
11	19.2	20.3	0.27	94	-37.4	7.6	0.74
12	24.2	29.3	1.91	469	-18.6	9.0	0.65
13	16.7	30.7	0.67	190	-36.6	6.0	0.55
14	17.8	25.0	0.31	94	-20.2	4.5	0.53

2.2 评价方法

主成分分析是把多个指标化为少数几个综合指标的统计分析方法,在力保数据信息丢失最少的原则下,找出几个主成分来代表原来众多的变量,使这些主成分尽可能地反映原来变量的信息量,而且彼此之间互不相关。本次利用主成分分析方法计算两个控制因子综合得分。

2.2.1 主成分分析的步骤

设 n 个单位 p 项指标的资料如下：

$$x = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}$$

a. 将数据进行标准化处理

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad i = 1, 2, \cdots, n \quad j = 1, 2, \cdots, p$$

其中 $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$ 为第 j 个变量的均值, $s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$ 为第 j 个变量的样本方差。

b. 计算相关系数矩阵 R

$$R = (r_{ij})_{p \times p}$$

其中

$$r_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n z_{ki} z_{kj}$$

$$i = 1, 2, \cdots, p \quad j = 1, 2, \cdots, p$$

c. 求相关系数矩阵 R 的特征向量 $u = (u_{ij})_{p \times p}$

和特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_p \geq 0$, 取累计方差贡献率超过 80% 的前 k 个主成分进行分析和评价。主成分是原变量的线性组合,

$$F_i = \sum_{j=1}^p u_{ij} z_j \quad i = 1, 2, \cdots, p$$

d. 建立综合主成分公式,求多个主成分得分之和。

2.2.2 尖点突变模拟

尖点突变模型中的地下水脆弱性状态变量用 x 表示,含水层状况控制变量 A 为正则因子,开采活动影响控制变量 B 为剖分因子,它的势函数是

$$V(x) = 1/4x^4 + 1/2Bx^2 + Ax \tag{1}$$

由突变理论知道,模型的平衡方程^[6]为

$$x^3 + Ax + B = 0 \tag{2}$$

该方程为尖点突变模型,在以 x 和 A 、 B 组成的三维空间中具有一个尖点褶皱部分的曲面。曲面的上叶为脆弱区,下叶为不脆弱区,中叶为不稳定较脆弱区。曲面在 BA 平面的投影见图 1。

分歧点集为

$$(A/2)^2 + (B/3)^3 = 0 \tag{3}$$

当 $B > 0$ 时, A 的变化只引起状态变量 x 的光滑变化,所以为正则因子。当 $B < 0$ 时,平衡曲面上出现褶皱, x 的变化不再连续出现突跳,所以 B 叫剖分因子。

方程(2)的根由式(4)确定,见图 1。

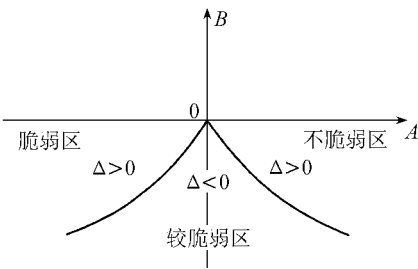


图 1 尖点突变区域

判别式

$$\Delta = (A/2)^2 + (B/3)^3 \tag{4}$$

$\Delta > 0$ 时,对满足该条件的 A 、 B ,只有一个 x 值与之对应,这时 A 、 B 处于尖点型区域外, x 处于稳定状态。 $\Delta = 0$ 时,若 $B = A = 0$,则 $x = 0$; A 、 B 处于尖点位置。 $\Delta < 0$ 时,对满足条件的 A 、 B 有不相等 3 个 x 值与之对应,这时 A 、 B 处在尖点型区域内。 x 为不稳定状态。

3 评 价

采用 spss11 统计分析软件^[7] 分别对 x_1, x_2, x_3 , 和 x_4, x_5, x_6, x_7 7 个评价因子进行主成分抽取,先对数据进行标准化处理,取得标准化值 Zx 。由于 7 个

表 3 评价区 A、B 值

综合 主成分	评价区序号													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	-0.390	-0.793	0.19	0.285	0.405	0.778	0.385	-0.38	0.199	0.376	-1.02	0.759	-0.1	-0.69
B	0.723	-0.007	0.21	-0.92	0.779	0.333	1.01	-1.09	-0.34	-0.4	0.0691	0.483	-0.584	-0.28

评价因子具有不同的量纲,变量水平差异很大,选择基于相关系数矩阵的主成分分析。对 Zx_1, Zx_2, Zx_3 三个表现含水层特征的标准化变量进行分析,抽取 $\lambda \geq 1$ 的两个主成分^[7],计算主成分的和,即综合主成分 A(其代表含水层特征)。对 Zx_4, Zx_5, Zx_6, Zx_7 四个表现开采活动影响的标准化变量进行分析,抽取累计方差贡献率达 88.8% 的两个主成分,计算主成分的和,即综合主成分 B(其代表开采活动影响)。

$$A = 0.129 Zx_1 + 0.3353 Zx_2 + 0.3915 Zx_3 \quad (5)$$

$$B = 0.2154 Zx_4 + 0.3244 Zx_5 - 0.1153 Zx_6 + 0.35098 Zx_7 \quad (6)$$

将标准化后的数值带入式(5)、(6)进行计算,结果见表 3。

将 A、B 值带入式(4)进行计算,可知 $\Delta < 0$ 的评价区有 4、8、13, x 状态为不稳定,脆弱性较强。其他评价区 $\Delta > 0$,由 A、B 值可知 2、14 评价区在脆弱区,其他区为不脆弱区。特殊脆弱性评价图见图 2。

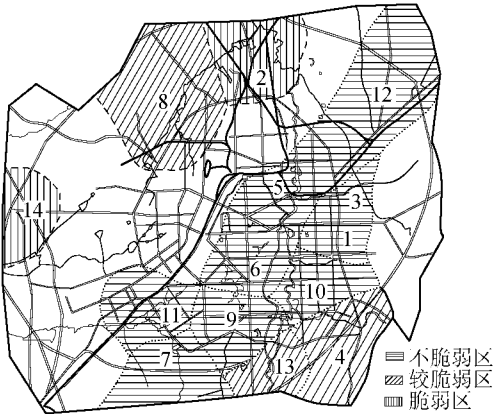


图 2 长春市城市地下水特殊脆弱性评价

从表 3 可以看出,2 区的 B 值非常接近于 0(尖点),鉴于 A 值,如果开采影响减少,此区将由脆弱区突变为不脆弱区。11 区的 B 值也接近于 0(尖点),鉴于 A 值,如果开采影响加大,此区将由不脆弱区突变为脆弱区。此现象体现出尖点区域的突跳特征。从这两个区也可以看出,随着开采影响的轻微变化,脆弱性的变化很大,取决于 B 处在尖点的正方向还是负方向,这体现出尖点突变的发散特征。尖点区内为潜在突变区,有些地方不可能达到稳定,这体现出尖点突变的不可达性。从此可以看出地下水特殊脆弱性具有尖点突变的 5 个特征,尖点突变

模型适用于地下水特殊脆弱性评价。

本次评价结果和用 Visual modflow 对长春城区地下水进行三维模拟预测得到的结果基本一致。在保持开采强度情况下,8、14 评价区漏斗中心水位持续下降,为超采漏斗。开采影响超出了含水层的承受能力,含水层脆弱。11 评价区受分水岭控制漏斗面积不再扩大,水位下降,为超采区,含水层脆弱。2、4、13 评价区处于波状起伏状态,含水层较脆弱。1、3、5、6、9、10 评价区水位变幅较小,漏斗保持稳定,7、12 评价区有开采潜力,可以扩大开采,含水层不脆弱。

4 结 论

从评价结果可以看出,突变理论较好地揭示了地下水特殊脆弱性变化,尖点突变模型可以模拟地下水特殊脆弱性变化,评价理论依据充分,所需数据较少,比数值模型模拟方法易于实行,评价结果可以为长春市地下水资源管理提供科学依据。

参考文献：

[1] 姜桂华. 地下水脆弱性研究进展[J]. 世界地质, 2002(1): 33 ~ 37.
[2] 安静,姜建祥,曹永宏. 长春市水系保护与治理对策研究[J]. 水资源保护, 2004, 20(3): 51 ~ 54.
[3] 杨庆,栾茂田. 地下水易污性评价方法——DRASTIC 指标体系[J]. 水文地质工程地质, 1999(2): 4 ~ 9.
[4] 桑博德. 突变理论及其应用[M]. 凌复华译. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1983. 1 ~ 172.
[5] 周绍江. 突变理论在环境影响评价中的应用[J]. 人民长江, 2003(2): 52 ~ 54.
[6] 汤洁,林年丰,黄奕龙. 尖点突变模型在研究洪水引起环境突变中的应用[J]. 环境科学学报, 2002(4): 443 ~ 447.
[7] 张文彤. spss11 统计分析教程[M]. 北京: 北京希望电子出版社, 2002. 190 ~ 210.

(收稿日期 2004-12-27 编辑 高渭文)

