



基于突变理论的乌江干流思南段岩溶地下水开发利用风险评价

胡 荣¹, 王先庆², 杨正飞³, 黄欣欣¹

1. 贵州省地质调查院, 贵州 贵阳 550081; 2. 贵州省地质矿产勘查开发局 114 地质大队, 贵州 遵义 563000;
3. 贵州兴黔人才资源有限责任公司, 贵州 贵阳 550001

摘 要: 水资源的储备和利用程度极大地影响着人类社会的发展。乌江干流思南段岩溶地下水资源丰富, 但地下水埋藏较深, 利用率较低。突发的极端干旱天气及长期的“三废”排放量增加, 使得区域内可利用的岩溶地下水资源面临严峻挑战。本研究围绕地下水开发利用风险问题, 基于突变理论, 建立地下水开发利用风险评价指标体系, 综合考虑区域自然背景条件、地下水开发现状和社会经济发展 3 个方面因素, 将研究区划分为 8 个水资源子评价区, 并设置了包括目标层、准则层(7 项指标)和指标层(13 项指标)三级指标评价体系, 运用综合风险值 5 级评价方法进行地下水开发利用风险评价。评价结果表明, 研究区地下水资源开发利用的综合风险值为 0.8345~0.9271, 处于中险—重险范围, 地下水开发风险较大, 各评价区域风险排序为: $IV < I_1 < VII < II < VI < I_2 < V < III$ 。评价结果可为区域地下水可持续开发利用提供理论依据。

关键词: 岩溶地下水; 突变理论; 指标评价体系; 地下水开发利用; 贵州省

RISK ASSESSMENT OF KARST GROUNDWATER DEVELOPMENT AND UTILIZATION IN THE SINAN SECTION OF WUJIANG RIVER BASED ON CATASTROPHE THEORY

HU Rong¹, WANG Xian-qing², YANG Zheng-fei³, HUANG Xin-xin¹

1. Guizhou Institute of Geological Survey, Guiyang 550081, China; 2. No. 114 Geological Brigade of Guizhou Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Zunyi 563000, Guizhou Province, China; 3. Guizhou Xingqian Human Resources Co., Ltd., Guiyang 550001, China

Abstract: The reserve and utilization of water resources greatly affect the social development. Despite the abundant karst groundwater resources in the Sinan section of Wujiang River, the utilization rate is low for its deep burial. Due to sudden extreme dry weather and increasing industrial pollution, the karst groundwater resources available in the region face severe challenges. Focusing on the problem of groundwater development and utilization risk, the study establishes the groundwater development and utilization risk evaluation index system on the basis of catastrophe theory. According to the regional natural background conditions, groundwater development status and socioeconomic development, the study area is divided into 8 water resources evaluation sub-zones, and a three-level index evaluation system including target layer, criterion layer (7 indicators) and index layer (13 indicators) is set up, with a five-grade comprehensive evaluation method to assess the risk of groundwater development and utilization. The results show that the

收稿日期:2023-02-03;修回日期:2023-04-25. 编辑:黄欣.

基金项目:中国地质调查局项目“贵州重点岩溶流域地下水勘查与开发示范”(1212011089026).

作者简介:胡荣(1983—),男,高级工程师,从事水工环调查、评价工作,通信地址 贵州省贵阳市观山湖区石林西路 171 号, E-mail//496612487@qq.com

通信作者:王先庆(1994—),男,硕士,从事水文地质、工程地质调查等工作,通信地址 贵州省遵义市银河北路桃溪河畔喜来登酒店国际商务中心, E-mail//1732762855@qq.com

comprehensive risk values of groundwater resources development and utilization range from 0.8345 to 0.9271, in medium-severe risk. The risk ranking of each sub-zone is as follows: $IV < I_1 < VII < II < VI < I_2 < V < III$. The evaluation results can provide theoretical basis for sustainable development and utilization of regional groundwater.

Key words: karst groundwater; catastrophe theory; index evaluation system; groundwater development and utilization; Guizhou Province

0 前言

地下水资源系统是极其复杂的充满不确定性的一个系统,因此,地下水开发利用过程中存在着不可预知的风险^[1-5]。国外对地下水资源风险问题的研究要早于我国,已具有一定的深度和广度。1981年, Nazar 等^[6]率先对风险指标进行量化处理;2002年, Hillenbrand^[7]对纽约的地下水污染进行风险分析的过程中首次运用了 GIS 技术;2005年, Ashrafie^[8]为了模拟垃圾处理厂所在地下水系统,建立了地下水网格剖分模型,并对该处理厂地下水污染风险进行了评价。基于我国地下水开发利用程度的日益增强,近年来,国内研究学者对地下水开发利用风险进行了多方面的研究^[9-11]。目前对地下水开发利用综合评价的方法有很多,但存在指标权重问题、计算繁琐、指标受限等。研究发现,突变理论模型对于地下水开发风险评价具有较好适用性^[12-13],并取得了较为合理的评价结果。

研究区内碳酸盐岩分布广泛,喀斯特极其发育,乌江干流河谷深切,地下水埋藏较深,极易受到极端气候(如干旱)的影响,导致区内严重缺水。随着研究区经济的快速腾飞,加之不断恶化的水环境,使得区域内相当部分可利用的水资源失去开发利用价值,直接威胁流域内居民的生产生活和身体健康^[14-16],同时对工业生产和农作物安全方面产生负面影响,严重制约了流域内经济可持续发展。水资源可持续利用是推动地方经济建设、调整当地产业结构、改善生态环境的关键一环。研究区岩溶地下水资源储量巨大,尚未得到充分有效的利用,具有较大的开发利用前景。为缓解居民用水短缺问题,促进地下水的可持续利用发展,本次研究基于思南县水文地质调查实践,分析区内自然环境、地下水开发利用现状、社会经济发展对地下水开发利用风险的影响,运用突变理论,对研究区地下水开发利用进行风险等级评价。该研究旨在为合理开发岩溶区地下水资源、实现地下水可持续利用发展提供科学依

据和理论基础。

1 研究区概况

1.1 自然地理

研究区地处贵州省北东部、乌江干流思南段,属长江水系一级支流。研究区地势由东、西向中部的乌江河谷倾斜,区内地貌类型和地貌形态多样,地貌区域差异明显。受地质构造影响,研究区主要处于扬子地层区,以二叠系—三叠系分布最广。区内地貌结构由发育过程不同、类型组合差异的低中山区、峡谷区、丘陵河谷区组合而成。在地貌形态方面,该地区的主要地貌类型为中山、低山、丘陵、河谷、盆地和河流阶地。

1.2 气象水文

研究区属于中亚热带季风湿润气候区,受季风影响,夏季以南风为主,冬季以北风为主,两股气流经常在境内交锋,形成多云或雷暴天气。区内多年平均降水量为 1 097.3~1 356.2 mm,年蒸发量为 700 mm 左右。主干河流为乌江,长度 108.13 km,流域面积 2 448 km²,河道宽 200~300 m,其横断面大部分为带有陡峭岩壁的“V”型河谷,相对高差 300~500 m。河床坡降 5‰,河水断面流量 1.9 m³/s,年均流量 901 m³/s。水系上游大部分为树枝状河流,下游大部分呈辫状河。

1.3 水文地质

研究区碳酸盐岩分布面积约占全区的 60%左右。地下水埋藏较深,极易受到极端气候(如干旱)的影响,导致区内严重缺水。地下水类型主要分为岩溶水、基岩裂隙水和孔隙水 3 类。地下水接受大气降水补给,其中白云岩分布区大气降水通过裂隙和溶孔渗入地下形成溶孔—溶隙水,灰岩区大气降水通过岩石裂隙和落水洞渗入地下形成溶洞—管道水。局部地带地表溪水消入地下形成地下水。受多种因素制约,地下水径流可分为喀斯特峡谷径流型、向斜汇流型和断裂构造带汇流型 3 种方式。区域地下水排泄与岩性、地质构

发展进行预测分析,以达到控制、预防突变发生的目的.目前突变理论的研究方向大致有 3 个方面:一是研究微分拓扑学和奇点理论;二是讨论相应的模型,即突变过程的势函数形式;三是突变理论的几何研究^[17-20].在本次应用中,采用相应的模型,即突变过程的势函数形式对乌江干流思南段岩溶地下水开发利用进行综合风险评价.

2.1.2 评价模型

初等突变理论^[21-24]主要根据势函数对临界点进行分类,然后对各类临界点附近非连续变化状态的特征进行研究,最后总结出初等突变模型的具体表达式.势函数中的变量可分为状态变量和控制变量两种,状态变量表示系统的行为状态,控制变量可作为影响行为状态的因素.初等突变总体可分为 7 种类型,按其几何形状分析总结出 7 种初等突变模型,分别是折叠型突变、尖点型突变、燕尾型突变、蝴蝶型突变、双曲型脐点突变、椭圆型脐点突变和抛物型脐点突变,具体表达式见表 1.

表 1 初等突变模型

Table 1 Elementary catastrophe models

突变种类	势函数	控制变量维数	状态变量维数
折叠型	$f(x)=x^3+ax$	1	1
尖点型	$f(x)=x^4+ax^2+bx$	2	1
燕尾型	$f(x)=x^5+ax^3+bx^2+cx$	3	1
蝴蝶型	$f(x)=x^5+ax^4+bx^3+cx^2+dx$	4	1
椭圆型脐点突变	$f(x)=\frac{1}{3}x^3-xy^2-a(x^2+y^2)-bx+cy$	3	2
双曲型脐点突变	$f(x)=x^3+y^2+axy-bx-cy$	3	2
抛物型脐点突变	$f(x)=y^4+x^2y+ax^2+by^2-cx-dy$	4	2

2.1.3 评价原则

针对实际问题的不同性质,在模糊综合分析评价过程中,应采用 3 种不同的准则对突变理论进行计算和分析.

1)非互补准则:当控制变量在评价体系中的作用不能相互替代时,按“大中取小”原则进行选取.

2)互补准则:当系统中的多个控制变量可以互补时,应按“取均值”原则进行取值.

3)过阈互补准则:进行互补的条件是控制变量必须达到某一阈值.

为使评价结果具有公正性和科学性,在遵循互补准则时,可能丢失主导因素,进而影响最终评价结果.因此,为避免此类事件的发生,可去掉不重要因素,并选取起重要作用的指标值.

2.2 子评价区分区

研究区属于山区地形,区内地下水的径流与排泄严格受地表水文网的控制,而在局部地区则受地质构造、地层岩性、地形地貌的制约.因此,子评价区的划分是以地表水文网和局部地下分水岭以及构造对地下水补、径、排条件所起的相对控制作用为基础,一方面根据地下水的赋存及排泄形式,按地下河及分散排泄系统进行划分;另一方面根据各子岩溶水系统均具有独立且完整的补给、径流、排泄条件,边界条件清楚,水力联系密切为划分原则.总体按地下水系统相对独立完整的原则进行划分.将研究区分为 8 个子评价区(图 2),即东华溪背斜子评价区(I₁、I₂)、许家坝向斜子评价区(II)、英武溪-瓮溪背斜子评价区(III)、塘头向斜子评价区(IV)、大坝场背斜子评价区(V)、青杠园

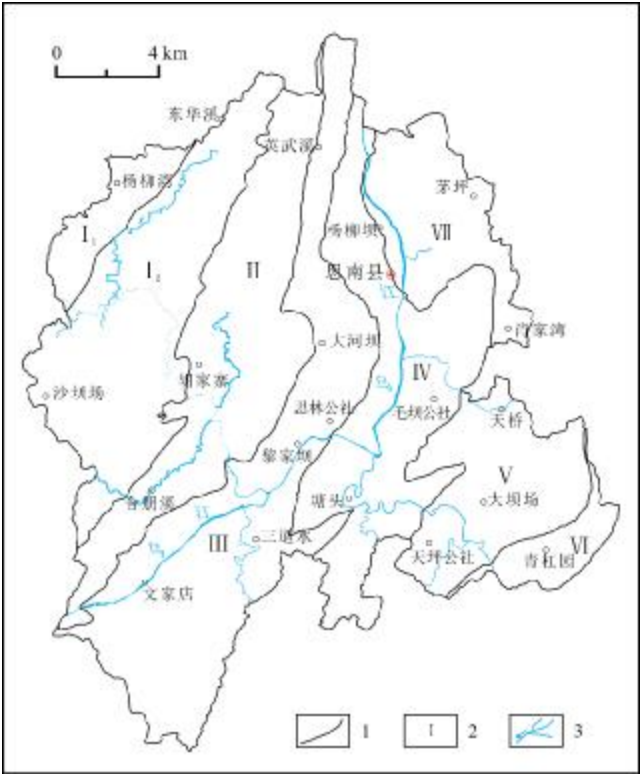


图 2 研究区子评价区分区图

Fig. 2 Zoning map of evaluation sub-zones in the study area
1—子评价区界线(boundary of sub-zone); 2—子评价区代号(number of sub-zone); 3—河流(river)

向斜子评价区(Ⅵ)、关口-水口子评价区(Ⅶ)。研究区内出露岩性以灰岩、白云岩为主,其次为泥岩。含水介质为溶洞、管道、溶隙、溶孔、裂隙,地下水类型为溶洞-裂隙水、溶洞-管道水、溶孔-溶隙水。子评价区Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ、Ⅵ、Ⅶ地下水以地下河、岩溶大泉的形式集中排泄,其余子评价区以岩溶泉、裂隙泉的形式分散排泄。地下水水质以一、二类为主,开发程度除Ⅲ、Ⅴ子评价区中等一较高外,其余子评价区开发程度及用水率均较低。

3 研究区地下水开发利用风险评价

3.1 评价指标体系的建立

本研究综合考虑了研究区的渗透系数、含水层厚度、地下水位埋深、年平均降雨量、地下水开采程度、地下水质量、人口增长率、GDP 增长率等 13 个方面因素,创建评价指标体系,并将其分为 4 个层次(图 3)。

研究区地下水开发风险评价指标体系由上述指标组成,其中既有正向指标,又有负向指标,所选取的指标可以从侧面体现出水文地质条件、水资源量、水质及社会经济等方面在地下水资源风险系统中的实际情况。本文数据主要来源于《思南县地下水资源勘查报告》和《思南县国民经济和社会发展统计公报》。

3.2 评价指标的选取

从突变理论主从角度,指标重要程度由上至下、由左至右逐渐递减。即 $A_1>A_2>A_3$, $B_1>B_2>B_3>B_4$, $C_1>C_2>C_3>C_4$, 且 $A_n>B_n>C_n$ 。

依据子评价区的分区,通过对资料的整理、分析和计算得出研究区各分区地下水开发利用风险评价指标体系中各指标的值(表 2)。

3.3 突变级数转换

地下水开发利用风险评价体系中选取的指标分正向指标和负向指标。其正向值越大,评价结果越优,风险越小;而负向值越小,评价结果越好,风险越小^[12]。为实现在整个评价体系中各指标间的可比性,必须对各指标的原始参数进行技术处理,将所得指标通过归一化转化为 0~1 的统一隶属度函数。转换公式如下。

对越大越优的指标:

$$Y = \begin{cases} 1 & 0 \leq X \leq a_1 \\ (a_2 - X)/(a_2 - a_1) & a_1 < X < a_2 \\ 0 & a_2 \leq X \end{cases} \quad (1)$$

对越小越优的指标:

$$Y = \begin{cases} 1 & a_1 \leq X \\ (X - a_1)/(a_2 - a_1) & a_1 < X < a_2 \\ 0 & 0 \leq X \leq a_1 \end{cases} \quad (2)$$

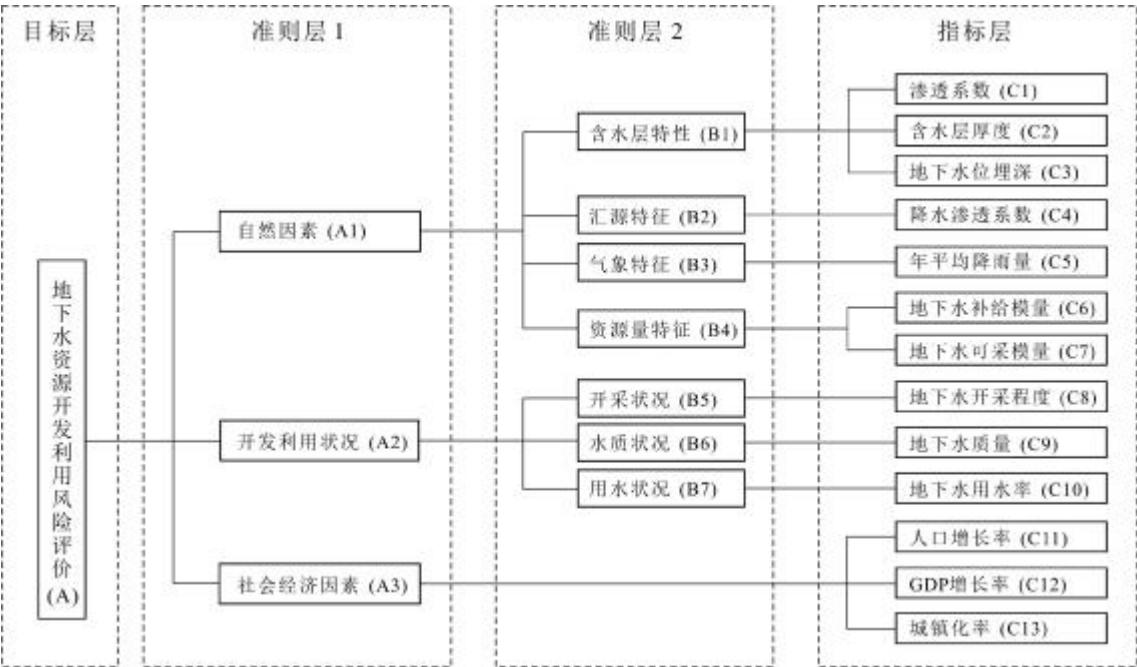


图 3 地下水开发利用风险评价指标体系

Fig. 3 Risk assessment index system for groundwater development and utilization

表 2 研究区地下水开发利用风险评价指标值

Table 2 Risk assessment index values for groundwater development and utilization in the study area									
指标	单位	I ₁	I ₂	II	III	IV	V	VI	VII
C ₁	m/d	0.23	0.18	0.17	0.15	0.23	0.17	0.12	0.1
C ₂	m	58	47	36	50	55	22	48	51
C ₃	m	27	29	39.5	27.3	47	22.5	21	19
C ₄	/	0.2	0.18	0.19	0.1	0.18	0.08	0.19	0.17
C ₅	mm	1097.3	1097.3	1097.3	1097.3	1097.3	1097.3	1097.3	1097.3
C ₆	10 ⁴ m ³ /(km·a)	18.26	5.46	17.18	6.47	16.65	7.66	17.29	8.04
C ₇	10 ⁴ m ³ /(km·a)	5.11	2.41	3.35	2.53	6.25	3.38	6.60	2.02
C ₈	%	25.43	24.95	18.97	36.03	16.37	48.32	20.48	20.9
C ₉	/	2	1	2	2	2	1	1	2
C ₁₀	%	20	20	20	20	20	20	20	20
C ₁₁	%	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01
C ₁₂	%	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9
C ₁₃	%	22	20	21	24	45	22	25	22

注:以上数据为 2011 年收集、实测.

对适中指标:

$$Y = \begin{cases} 2(X - a_1)/(a_2 - a_1) & a_1 \leq X \leq a_1 + (a_2 - a_1)/2 \\ 2(a_2 - X)/(a_2 - a_1) & a_1 + (a_2 - a_1)/2 < X < a_2 \\ 0 & X > a_2 \text{ 或 } X < a_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中 a_1 、 a_2 为函数的上限和下限, 上、下限可根据实际情况近似估算, 使指标处于一定的范围内. 当根据实际情况不能获得上限和下限时, 上限和下限由每个指数的最大值和最小值增加或减少 10% 来确定. 按此操作得出研究区各分区地下水风险评价指标数值转换结果, 见表 3.

3.4 突变级数计算

利用各突变系统的归一化公式, 根据地下水评价指标体系结构, 以单项指标层为基础, 逐级向上进行综合, 最终求得各个分区评价指标突变级数大小. 具体计算过程如下(以分区 VI 为计算例).

1) 自然因素(A1)指标体系中突变级数计算

A1 体系中包含了 B1、B2、B3、B4 四个指标.

B1(含水层特性)的 C1、C2、C3 三个指标, 满足燕尾突变归一化公式, 因此有: $x_{C1}=0.816^{1/2}=0.903$, $x_{C2}=$

表 3 乌江干流思南段岩溶地下水开发利用风险评价指标转化值

Table 3 Conversion values of risk assessment indexes for karst groundwater development and utilization

指标	I ₁	I ₂	II	III	IV	V	VI	VII
C ₁	0.141	0.448	0.509	0.632	0.141	0.509	0.816	0.939
C ₂	0.132	0.382	0.632	0.314	0.200	0.950	0.359	0.291
C ₃	0.286	0.344	0.647	0.295	0.864	0.156	0.113	0.055
C ₄	0.135	0.270	0.203	0.811	0.270	0.946	0.203	0.338
C ₅	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
C ₆	0.120	0.964	0.192	0.897	0.226	0.819	0.184	0.794
C ₇	0.395	0.891	0.719	0.869	0.185	0.712	0.121	0.963
C ₈	0.278	0.266	0.110	0.554	0.043	0.874	0.150	0.161
C ₉	0.846	0.077	0.846	0.846	0.846	0.077	0.077	0.846
C ₁₀	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
C ₁₁	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
C ₁₂	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
C ₁₃	0.127	0.063	0.095	0.190	0.857	0.127	0.222	0.127

$0.359^{1/3}=0.711$, $x_{C3}=0.113^{1/4}=0.579$. 又因为 C1、C2、C3 满足非互补原则,所以按“大中取小”原则, $x_{B1}=x_{C3}=0.579$.

B2(汇源特征)中有 C4 一个指标,构成折叠突变,因此有: $x_{B2}=x_{C4}=0.203^{1/2}=0.450$.

B3(气象特征)中有 C5 一个指标,构成折叠突变,因此有: $x_{B3}=x_{C5}=0.500^{1/2}=0.707$.

B4(资源量特性)中的 C6、C7 两个指标,满足尖点突变归一化公式,因此有: $x_{C6}=0.184^{1/2}=0.429$, $x_{C7}=0.121^{1/3}=0.495$. 又因为 C6、C7 符合互补原则,所以按“取平均值”原则, $x_{B4}=(0.429+0.495)/2=0.462$.

B1、B2、B3、B4 四个指标满足蝴蝶突变归一化公式,因此有: $x_{B1}=0.579^{1/2}=0.761$, $x_{B2}=0.450^{1/3}=0.766$, $x_{B3}=0.707^{1/4}=0.917$, $x_{B4}=0.462^{1/5}=0.857$. 又因为 B1、B2、B3、B4 满足非互补原则,所以按“大中取小”原则, $x_{A1}=x_{B1}=0.761$.

2)开发利用状况(A2)指标体系突变级数计算

A2 体系中包含了 B5、B6、B7 三个指标.

B5(开采状况)中有 C8 一个指标,构成折叠突变,因此有: $x_{C8}=0.150^{1/2}=0.387$.

B6(地下水质量)中有 C9 一个指标,构成折叠突变,因此有: $x_{C9}=0.077^{1/2}=0.277$.

B7(用水率状况)中仅存在 C10 一个指标,满足折叠突变归一化公式,因此有: $x_{C10}=0.500^{1/2}=0.707$

B5、B6、B7 三个指标满足燕尾突变归一化公式,因此有: $x_{B5}=0.387^{1/2}=0.622$, $x_{B6}=0.277^{1/3}=0.657$, $x_{B7}=0.707^{1/4}=0.917$. 又因为 B5、B6、B7 适用于非互补原则,所以按“大中取小”原则, $x_{A2}=x_{B5}=0.622$.

3)社会经济因素(A3)指标体系突变级数计算

A3 体系中包含了 C11、C12、C13 三个指标.

C11、C12、C13 三个指标构成燕尾突变,因此有: $x_{C11}=0.500^{1/2}=0.707$, $x_{C12}=0.500^{1/3}=0.794$, $x_{C13}=0.222^{1/4}=0.687$. 又因为 C11、C12、C13 符合互补原则,所以按“取平均值”原则, $x_{A3}=(0.707+0.794+0.222)/3=0.729$.

4)目标层(A)突变级数计算

A 体系中包含了 A1、A2、A3 三个指标.

A1、A2、A3 三个指标满足燕尾突变归一化公式,因此有: $x_{A1}=0.761^{1/2}=0.872$, $x_{A2}=0.622^{1/3}=0.854$, $x_{A3}=0.729^{1/4}=0.924$. 又因为 A1、A2、A3 符合互补原则,所以按“取平均值”原则, $x_A=(0.872+0.854+0.924)/3=0.8834$.

同理,可求得其他分区评价指标突变级数(R)大小(表 4).

表 4 地下水开发利用各风险评价指标突变级数及综合评价结果

Table 4 Catastrophe series of risk assessment indexes and comprehensive evaluation results for groundwater

development and utilization								
指标	I ₁	I ₂	II	III	IV	V	VI	VII
C ₁	0.376	0.669	0.714	0.795	0.376	0.714	0.903	0.969
C ₂	0.509	0.725	0.858	0.679	0.585	0.983	0.711	0.663
C ₃	0.731	0.766	0.897	0.737	0.964	0.629	0.579	0.484
C ₄	0.368	0.520	0.450	0.900	0.520	0.973	0.450	0.581
C ₅	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707
C ₆	0.347	0.982	0.438	0.947	0.476	0.905	0.429	0.891
C ₇	0.734	0.962	0.896	0.954	0.570	0.893	0.495	0.987
C ₈	0.528	0.516	0.332	0.745	0.206	0.935	0.387	0.401
C ₉	0.920	0.277	0.920	0.920	0.920	0.277	0.277	0.920
C ₁₀	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707
C ₁₁	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707
C ₁₂	0.794	0.794	0.794	0.794	0.794	0.794	0.794	0.794
C ₁₃	0.597	0.502	0.556	0.661	0.962	0.597	0.687	0.597
B ₁	0.376	0.669	0.714	0.679	0.376	0.629	0.579	0.484
B ₂	0.368	0.520	0.450	0.900	0.520	0.973	0.450	0.581
B ₃	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707
B ₄	0.540	0.972	0.667	0.951	0.523	0.899	0.462	0.939
B ₅	0.528	0.516	0.332	0.745	0.206	0.935	0.387	0.401
B ₆	0.920	0.277	0.920	0.920	0.920	0.277	0.277	0.920
B ₇	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707	0.707
A ₁	0.613	0.804	0.766	0.824	0.613	0.793	0.761	0.696
A ₂	0.726	0.652	0.576	0.863	0.454	0.652	0.622	0.633
A ₃	0.699	0.668	0.685	0.720	0.821	0.699	0.729	0.699
A	0.8654	0.8893	0.8725	0.9271	0.8345	0.8907	0.8834	0.8691

3.5 结果分析

根据青春炳、潘华盛等^[25-26]的风险等级划分标准,对乌江干流思南段岩溶地下水开发利用风险状态等级大小进行划分,结果如表 5,并绘制地下水开发风险综合评价结果柱状图(图 4). 通过综合分析,研究区内地下水开发综合风险值在 0.8345~0.9271 之间,根据地下水开发利用风险状态等级划分标准,研究区内地下

表 5 地下水开发利用风险状态等级划分标准

Table 5 Grading criteria for groundwater development and utilization risk status

等级	微险	轻险	中险	重险	特险
数值	$R \leq 0.3$	$0.3 < R \leq 0.5$	$0.5 < R \leq 0.85$	$0.85 < R \leq 0.95$	$0.95 \leq R$

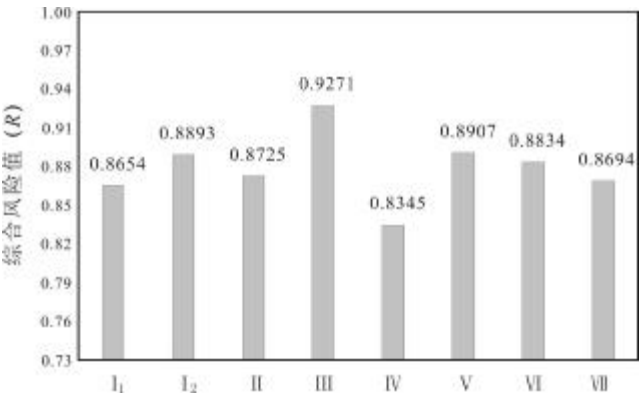


图 4 地下水开发风险综合评价结果柱状图

Fig. 4 Histogram of comprehensive evaluation results for groundwater development risk

水开发风险均属于中险—重险,且风险排序为: $IV < I_1 < VII < II < VI < I_2 < V < III$. 除 VI 区域处于中险状态外,其余 7 个区域均处于重险状态水平. 其中区域 III 风险值为最高,其地下水补给模数和地下水可采模数为 6.47 和 2.53,风险值分别为 0.947 和 0.954,处于重险和特险状态;区域 V 的含水层厚度、降水入渗系数和地下水开采程度风险值较大,所以其地下水开发综合风险值较高;区域 I₂ 地下水补给模数和地下水可采模数均较低,导致其风险值偏高;区域 VI 含水层渗透系数较低,地下水开发综合风险值为 0.8834;区域 II 含水层厚度和地下水可采模数相对较小,地下水位埋深较大,地下水开发综合风险值为 0.8725;区域 VII 含水层渗透系数、地下水补给模数和地下水可采模数的风险值较大;区域 I₁ 较其他区域各个指标风险值均处于中等水平,地下水开发综合风险值为 0.8654;区域 IV 含水层渗透系数、含水层厚度、地下水补给模数、地下水可采模数和地下水开采程度风险值均处于较低水平,所以地下水开发综合风险值较小,且为 0.8345,属中险状态.

4 结论

1) 根据实际调查结果,研究区内大部分地区处于

岩溶缺水状态,其生态环境极易遭受诸多因素的破坏,故本次评价结果在一定程度上与研究区实际情况相符,说明本论文所建立的评价体系及运用突变模型的方法是合理可行的.

2) 在地下水开发突变理论方法研究的基础上,构建了地下水开发风险综合评价指标体系. 该体系由 13 项影响因素构成,使评价结果具有全面性和代表性. 突变模型分析表明:研究区地下水资源各子评价区地下水开发利用综合风险值均在 0.8345~0.9271 之间. 根据地下水开发利用风险状态等级划分标准,研究区内地下水开发风险均属于中险—重险,且各评价区域风险排序为 $IV < I_1 < VII < II < VI < I_2 < V < III$. 除 VI 区域处于中险状态外,其余 7 个区域均处于重险状态水平. 综上所述,乌江干流思南段岩溶地下水开发风险较大,地下水开发利用的形势不容乐观.

3) 鉴于以上研究,对区域地下水资源开发利用提出以下建议:水资源开发应以利用地表水为主,地下水开发为辅;完善现有供水配套设施以保证缺水地区的人畜用水;地下水资源开发利用应以开发地下水天然露头为主,根据区域水文地质条件,适当地进行打井取水工程.

参考文献(References):

[1] 李中斌. 风险管理解读[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 5-15.
Li Z B. Explication of risk management [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 5-15.

[2] Voetsch R J. The current state of project risk management practices among risk sensitive project management professionals[D]. Washington: The George Washington University, 2004.

[3] 田辉, 郭晓东, 刘强, 等. 大庆市地下水开采现状及环境地质问题探讨[J]. 地质与资源, 2012, 21(1): 139-142, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2012.01.027.
Tian H, Guo X D, Liu Q, et al. Study on the groundwater exploitation and geological environment problems in Daqing City[J]. Geology and Resources, 2012, 21 (1): 139 -142, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy. 2012.01.027.

[4] 黄长生, 周耘, 张胜男, 等. 长江流域地下水资源特征与开发利用现状[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 979-1000.
Huang C S, Zhou Y, Zhang S N, et al. Groundwater resources in the Yangtze River Basin and its current development and utilization [J]. Geology in China, 2021, 48(4): 979-1000.

[5] 孙跃, 岳运华, 刘中刚, 等. 基于 GMS 的傍河应急水源地下水资源评价[J]. 地质与资源, 2019, 28(1): 72-77, doi: 10.13686/j.

- cnki.dzyzy.2019.01.012.
- Sun Y, Yue Y H, Liu Z G, et al. Evaluation on the groundwater resources in riverside emergency water source based on GMS [J]. *Geology and Resources*, 2019, 28(1): 72–77, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2019.01.012.
- [6] Nazar A M, Hall W A, Albertson M L. Risk avoidance objective in water resources [J]. *Journal of the Water Resources Planning and Management Division*, 1981, 107(1): 201–209.
- [7] Hillenbrand III C J. Groundwater-risk analysis of New York utilizing GIS technology [D]. New York: City University of New York, 2002.
- [8] Ashrafi F M. Evaluation of the Potential contamination risk to groundwater posed by municipal landfill leachate [D]. Regina: University of Regina, 2004.
- [9] 刘道祥. 水资源系统风险管理研究综述[J]. *西北水电*, 2003(1): 5–8.
- Liu D X. Summary for risk management of water resources system [J]. *Northwest Hydropower*, 2003(1): 5–8.
- [10] 冶雪艳. 黄河下游悬河段地下水开发风险评价与调控研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- Ye X Y. Study on evaluation and regulation of groundwater pumping risk in perched section of down-Yellow River [D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [11] 杨会峰, 孟瑞芳, 李文鹏, 等. 海河流域地下水资源特征和开发利用潜力 [J]. *中国地质*, 2021, 48(4): 1032–1051.
- Yang H F, Meng R F, Li W P, et al. Groundwater resources of the Haihe River Basin and its development potential [J]. *Geology in China*, 2021, 48(4): 1032–1051.
- [12] 项国圣. 黑河中游张掖盆地地下水开发风险评价及调控 [D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- Xiang G S. Risk assessment and regulation of groundwater development in Zhangye Basin of the middle reaches of the Heihe River [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.
- [13] 党爽. 贵阳地区岩溶地下水资源现状及开发利用风险评价 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.
- Dang S. Regulation of karst groundwater utilization risk and resources present situation of Guiyang summary [D]. Guiyang: Guizhou University, 2015.
- [14] 袁道先. 岩溶地区的地质环境和水文生态问题 [J]. *南方国土资源*, 2003(1): 22–25.
- Yuan D X. Geological environment and hydrogeological ecological issues in karst areas [J]. *Nanfang Guotu Ziyuan*, 2003(1): 22–25. (in Chinese)
- [15] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题 [J]. *世界科技研究与发展*, 1997, 19(5): 41–43.
- Yuan D X. On the environmental and geologic problems of karst mountains and rocks in the South-West China [J]. *World Sci-Tech R & D*, 1997, 19(5): 41–43.
- [16] 夏日元, 卢海平, 曹建文, 等. 南方岩溶区地下水资源特征与水资源保障对策 [J]. *中国地质*, 2022, 49(4): 1139–1153.
- Xia R Y, Lu H P, Cao J W, et al. Characteristics of groundwater resources of karst areas in the Southern China and water resources guarantee countermeasures [J]. *Geology in China*, 2022, 49(4): 1139–1153.
- [17] Poston T, Stewart I. Catastrophe theory and its applications [M]. London: Pitman, 1978: 35–48.
- [18] Arnold V I. Catastrophe theory [M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 1986.
- [19] 阿诺德. 突变理论 [M]. 周燕华, 译. 北京: 高等教育出版社, 1990: 1–26.
- Arnold V I. Catastrophe theory [M]. Zhou Y H, trans. Beijing: Higher Education Press, 1990: 1–26.
- [20] 施玉群. 突变评价法在水利系统经营效益评估中的应用 [J]. *水利经济*, 1997, 15(2): 52–55.
- Shi Y Q. Application of catastrophe evaluation method in evaluating the operating benefits of water conservancy systems [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 1997, 15(2): 52–55. (in Chinese)
- [21] 何平, 赵子都. 突变理论及其应用 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1989: 3–9.
- He P, Zhao Z D. Catastrophe theory and its applications [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1989: 3–9. (in Chinese)
- [22] 都兴富. 突变理论在经济领域的应用(上、下册) [M]. 北京: 电子科技大学出版社, 1994: 10–25.
- Du X F. The application of catastrophe theory in the economic field (Part 1, Part 2) [M]. Beijing: University of Electronic Science and Technology of China Press, 1994: 10–25. (in Chinese)
- [23] 蒋琳琳, 张昊罔, 倪福全. 基于突变理论的农村饮水安全风险评价 [J]. *人民珠江*, 2016, 37(7): 98–101.
- Jiang L L, Zhang J J, Ni F Q. Risk evaluation of rural drinking water safety based on catastrophe theory [J]. *Pearl River*, 2016, 37(7): 98–101.
- [24] 何金平, 李珍照. 基于环境突变理论综合评价的水电站建设方案优选 [J]. *水电站设计*, 1998, 14(1): 12–16.
- He J P, Li Z Z. Hydroelectric plant construction scheme optimum selection synthetically assessed on basis of environment catastrophe theory [J]. *Design of Hydroelectric Power Station*, 1998, 14(1): 12–16.
- [25] 青春炳, 苟兴华. 灾害评价、风险评价和灾情评价 [J]. *大自然探索*, 1991, 10(2): 65–70.
- Qing C B, Gou X H. Disaster evaluation, risk evaluation and damage evaluation [J]. *Exploration of Nature*, 1991, 10(2): 65–70.
- [26] 潘华盛, 张桂华, 董淑华. 黑龙江省洪水灾害等级评估模型——模糊综合评价法 [J]. *黑龙江气象*, 2000, 17(2): 1–4, 14, doi: 10.14021/j.cnki.hljqx.2000.02.001.
- Pan H S, Zhang G H, Dong S H. An estimation model of flood grade in Heilongjiang Province: The method of fuzzy overall evaluation [J]. *Heilongjiang Meteorology*, 2000, 17(2): 1–4, 14, doi: 10.14021/j.cnki.hljqx.2000.02.001.