

## 山东典型岩溶水水源地水质演化预测

张中祥<sup>1</sup>, 祝子慧<sup>2</sup>, 刘传娥<sup>1</sup>, 罗斐<sup>1</sup>

(1. 山东省地矿工程勘察院, 山东 济南 250014; 2. 山东省第四地质矿产勘查院, 山东 潍坊 261021)

**摘要:**根据山东省多年地下水水质监测资料,选取水质变化大、监测资料较为齐全的典型岩溶水水源地,采用均值自回归模型,研究水质历时变化规律和演化趋势。现状经济社会发展环境和开采条件下,预测2020年、2030年典型水源地水质呈劣向演化趋势,部分水源地主要组分含量将达Ⅳ类或Ⅴ类水,部分单项指标含量将超过生活饮用水卫生标准,原本优质饮用地下水供水前景堪忧,加强水源地外部环境保护和调蓄岩溶水系统资源量是防治水质恶化的主体内容。

**关键词:**预测;岩溶水;水源地;水质模型;山东

**中图分类号:**TU991.11 **文献标识码:**B

## 0 引言

岩溶水是山东省重要的供水水源,主要分布在鲁中南山前及山间断陷盆地,建有大型、特大型工业及城市集中供水水源地,碳酸盐岩为主要含水介质,具有埋深小、水量大、水质优等特点。近30年来,山东省社会经济迅猛发展,城镇化和工业化水平快速提高,随之带来了城市和工农业污染加重等一系列问题,加之地下水开采量增加,岩溶水系统补径排条件发生变化,矿化度、总硬度、硫酸盐、硝酸盐等组分含量均出现不同程度增高,某些区域已严重影响工农业生产和人们的正常生活<sup>[1]</sup>。多年来,各级政府和主管部门高度重视地下水污染问题,相继开展以地下水污染为主题的公益性勘查研究工作,加强地下水环境监测力度,建立地质环境监测网络,为全面掌握山东省区域地下水水质现状积累了大量资料,为水质演化趋势预测提供了资料支撑。该文以2009年山东省地质矿产勘查开发局立项实施的“山东省重大水文地质问题”项目为依托,选取具有代表性的典型岩溶水水源地,利用历年水质监测资料,研究其演化过程和发展趋势,为地下水地质环境保护与防治提供参考。

山东省岩溶水水源地众多,但具备预测条件的

水源地却很少,或因水质监测数据系列较短,或因测试项目较少,不能满足预测建模要求。笔者根据历年水质测试资料情况,认为泰安旧县、莱芜叶马曹、枣庄十里泉和渴口、丁庄-东王庄岩溶水水源地水质监测历时较长,且阶段性演化趋势明显,尤其是硝酸盐和硫酸盐污染在山东省地下水污染中代表性较强,具有一定的学术研究价值。

## 1 预测模型的建立

## 1.1 预测指标的选取

水质演化预测是地下水地球化学环境演化的一项重要研究内容,是地下水合理开发利用、防治水质恶化和环境保护的前瞻性工作。反映水质演化趋势的指标很多,矿化度是水中化学组分含量的总和,能够较好地反映水质总体变化趋势,总硬度也是表征地下水质量优劣的主要指标,硫酸盐和硝酸盐是近些年岩溶水污染的主要影响因素<sup>[2]</sup>。因此,选择矿化度、总硬度、硫酸盐和硝酸盐来建模。

## 1.2 模型适用条件

水质预测模型很多,根据实际资料情况,选择均值自回归模型。该模型的建立是以大量数据统计为基础,能够真实地反映水质总体变化趋势,其中的均值是指每年观测值( $x_i$ )服从对数正态分布的自然对

收稿日期:2013-09-02;修订日期:2013-11-28;编辑:曹丽丽

作者简介:张中祥(1967—),男,山东东阿人,高级工程师,主要从事水文、环境、地热勘查研究工作;E-mail:zhongxiangz67@163.com。

数的算术平均值( $y$ ),也就是每年观测值服从对数正态分布的几何平均值( $x_g$ )的自然对数。即: $y = \frac{1}{n} \sum \ln x_i = \ln x_g$  ( $n$ 为历年样品数)。根据概率统计学理论,当观测值呈现对数正态分布时,观测值的几何平均值、中值、众值彼此相等,因此上述均值具有很好的代表性,用这种水质模型预测能够较好地反映水质总体变化趋势<sup>[3]</sup>。

为了用样本观测值对总体参数进行估计,在建模之前,需检验每一时间段观测值是否服从对数正态分布,将实测值划分为若干个时间段。经 $\alpha^2$ 检验,在给定显著水平为0.05时,历年地下水矿化度、总硬度、硫酸盐、硝酸盐观测值既要服从对数正态分布,又要考虑时间的等距性。因此,针对不同的预测区选取以一年为等距时间序列的不同时间区间,研究各地地下水矿化度、总硬度等的演化趋势。

设样本观测值的对数值为 $y_1, y_2, \dots, y_n$ ;  $y$ 为总体数学期望,可用样本的算术平均值作为总体期望的估计量,则有 $y = \frac{1}{n} \sum y_i$ 。若将某一时间段历年观测值的对数值的算术平均值 $y$ 看成总体参数 $y$ 的时间序列,即 $\{y_i\} = y_1, y_2, \dots, y_n$ 。考虑到地下水中各离子浓度变化的继承性和惰性以及对地下水开采的继续,可以认为矿化度总体在今后一定时期内还将以上述趋势继续演变下去。

### 1.3 模型拟合原理

为了拟合总体期望 $y$ 的趋势变化,选用 $y_t = a + bt, y_t = ae^{bt}, y_t = at^b, y_t = a + blnt, y_t = t/(a + bt), y_t = a + b/t, y_t = 1/(a + bt), y_t = a + bt + ct^2$ 等8种单调趋势演化关系式,在给定显著水平0.05下,选择相关系数 $r, F$ 值最大,变异系数最小者为拟合预测模型。 $r$ 表示的是拟合优度,它是用来衡量估计的模型对观测值的拟合程度,它的值越接近1,说明拟合程度越好。 $F$ 值是回归方程的显著性检验,表示的是模型中被解释变量与所有解释变量之间的线性关系在总体上是否显著做出推断<sup>[4]</sup>。

## 2 水质演化预测

### 2.1 泰莱盆地岩溶水水源地

泰莱盆地内符合预测条件的岩溶水水源地有泰安旧县和莱芜叶马曹。泰安旧县水源地利用

1987—2003年、莱芜叶马曹水源地利用1991—2007年实测值的对数平均值代入模型进行运算,选择矿化度、总硬度、硫酸根、硝酸根最佳拟合预测方程。预测结果显示:两水源地岩溶水矿化度、总硬度、硫酸根预测方程均为乘幂型,硝酸根预测方程为直线型;由图1可见,2008年旧县水源地地下水矿化度、总硬度、硫酸根、硝酸根实测平均值均落在模型预测值误差限内,拟合均值线均呈上升趋势。2020年、2030年两水源地地下水主要组分含量预测结果见表1、表2。

表1 旧县岩溶水主要组分预测值与实测值对比(mg/L)

预测时间/年		1987	2008	2020	2030
矿化度	预测方程	$y_t = 5.8028t^{0.0408}$			
	预测值	331.2	722.5	813	872.7
	实测值	344.5	654		
总硬度	预测方程	$y_t = 5.1864t^{0.0484}$			
	预测值	178.8	413	469.5	507.2
	实测值	185.3	370		
硫酸根	预测方程	$y_t = 3.5748t^{0.00518}$			
	预测值	35.7	66.4	73.1	77.4
	实测值	33.1	95.5		
硝酸根	预测方程	$y_t = 2.6589 + 0.0967t$			
	预测值	15.7	119.9	382.5	1006
	实测值	16.3	108.5		

表2 叶马曹岩溶水主要组分预测值与实测值对比(mg/L)

预测时间/年		1991	2008	2020	2030
矿化度	预测方程	$y_t = 6.2996e^{0.0011t}$			
	预测值	548.1	617.4	672.5	722.7
	实测值	554.4	564		
总硬度	预测方程	$y_t = 5.7848 + 0.0081t$			
	预测值	328	376.4	414.8	449.8
	实测值	319	297		
硫酸根	预测方程	$y_t = 4.7678t^{0.017}$			
	预测值	117.7	149.6	156.3	160.2
	实测值	125.5	119.4		
硝酸根	预测方程	$y_t = 3.0169 + 0.227t$			
	预测值	20.9	30.7	40.4	50.6
	实测值	22.9	38.1		

### 2.2 枣陶盆地岩溶水水源地

枣庄十里泉水源地利用1991—2006年、渴口和丁庄-东王庄水源地利用1991—2005年实测值的对数平均值代入模型进行运算,选择最佳拟合预测方程。预测结果显示:十里泉岩溶水矿化度、总硬度预测方程均为倒数型,硫酸根预测方程为直线型,硝酸根预测方程为对数型;渴口矿化度预测方程为直线型,总硬度、硫酸根预测方程为对数型,硝酸根预测方程为乘幂型;丁庄-东王庄矿化度、硫酸根预测方

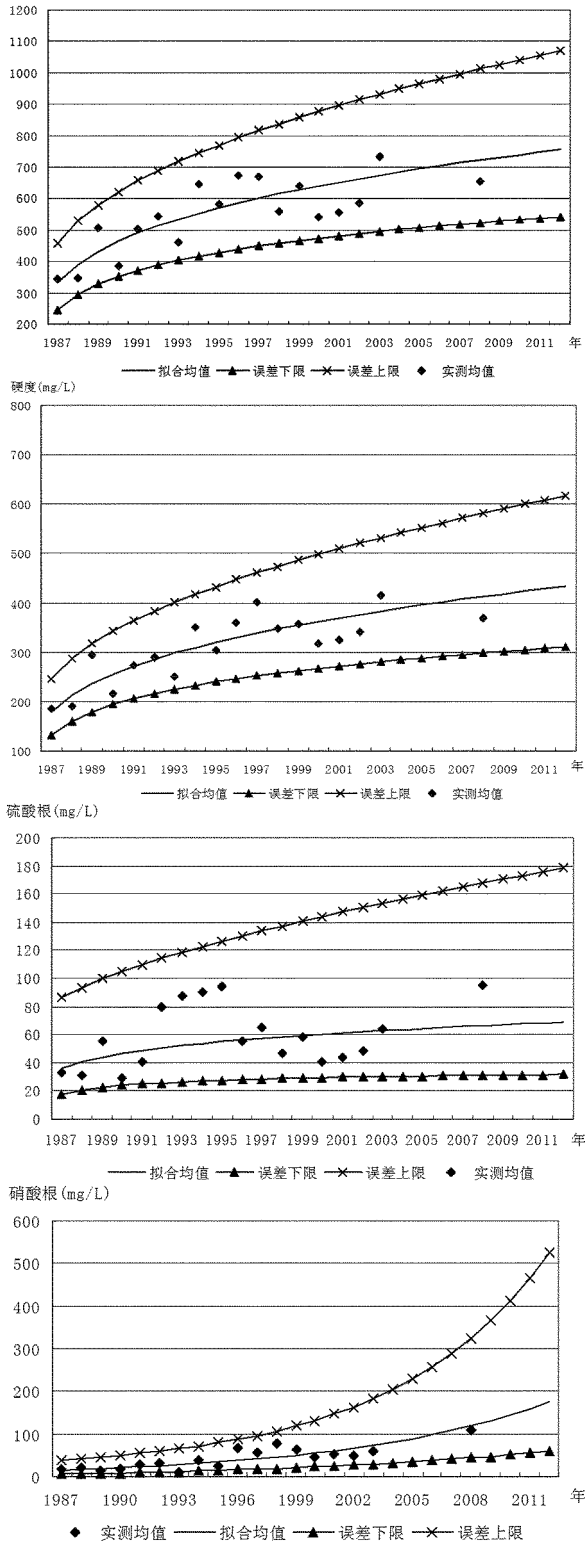


图1 泰安旧县岩溶水主要组分拟合预测值历时曲线程为直线型,总硬度、硝酸根预测方程为对数型。2008年各水源地地下水矿化度、总硬度、硫酸根、硝酸根实测平均值均落在模型预测值误差限内。十里泉地下水矿化度、总硬度拟合均值线呈前期升幅大、

后期平缓上升的趋势,硫酸根则为总体下降,硝酸根为平缓上升(图2),而丁庄-东王庄水源地4条拟合均值线均呈上升趋势(图3)。2020年、2030年3个水源地地下水主要组分含量预测结果见表3、表4、表5。

表3 十里泉岩溶水主要组分预测值与实测值对比(mg/L)

预测时间/年	1991	2008	2020	2030	
矿化度	预测方程	$y_t = 6.8679 - 0.3325/t$			
	预测值	689.1	943.3	950.3	953
	实测值	729.9	944		
总硬度	预测方程	$y_t = 6.4762 - 1.2014/t$			
	预测值	195.4	607.6	624	630.3
	实测值	150.4	537		
硫酸根	预测方程	$y_t = 5.8519 - 0.0211t$			
	预测值	340.6	238	184.7	149.6
	实测值	317	188.1		
硝酸根	预测方程	$y_t = 3.502 + 0.1884\ln t$			
	预测值	33.18	57.2	63	66.5
	实测值	48	54.4		

表4 渴口岩溶水主要组分预测值与实测值对比(mg/L)

预测时间/S年	1991	2008	2020	2030	
矿化度	预测方程	$y_t = 5.6992 + 0.0604t$			
	预测值	317.2	885.7	1828.4	3344.9
	实测值	442.7	635		
总硬度	预测方程	$y_t = 4.8549 + 0.4484\ln t$			
	预测值	128.4	469.2	589.9	671.2
	实测值	99.7	390		
硫酸根	预测方程	$y_t = 3.7373 + 0.4285\ln t$			
	预测值	42	144.9	180.3	204
	实测值	51.9	115.5		
硝酸根	预测方程	$y_t = 2.1585t^{0.2241}$			
	预测值	8.7	61.9	102.1	138.9
	实测值	12	60.9		

表5 丁庄-东王庄岩溶水主要组分预测值与实测值对比(mg/L)

预测时间/年	1991	2008	2020	2030	
矿化度	预测方程	$y_t = 5.9975 + 0.0546t$			
	预测值	425	1075.2	2070.4	3574.2
	实测值	441.5	926		
总硬度	预测方程	$y_t = 4.957 + 0.4983\ln t$			
	预测值	142.2	600.2	774.2	893.5
	实测值	89.9	494		
硫酸根	预测方程	$y_t = 4.7912 + 0.0514t$			
	预测值	126.8	303.8	563	941.2
	实测值	146	325.1		
硝酸根	预测方程	$y_t = 2.5769 + 0.3252\ln t$			
	预测值	13	33.7	39.8	43.7
	实测值	10	45.5		

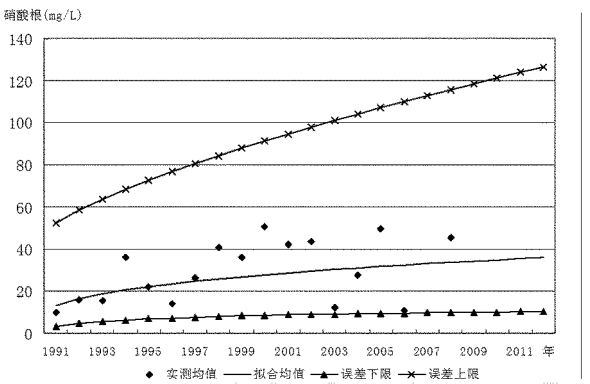
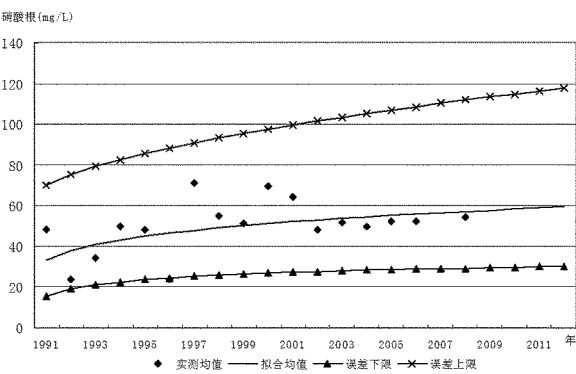
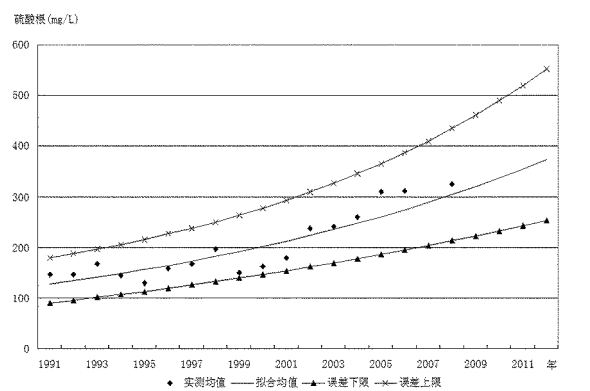
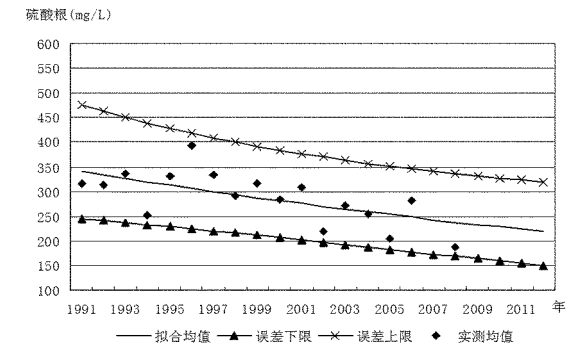
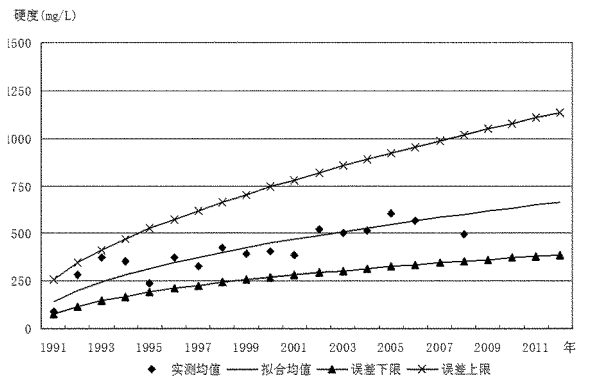
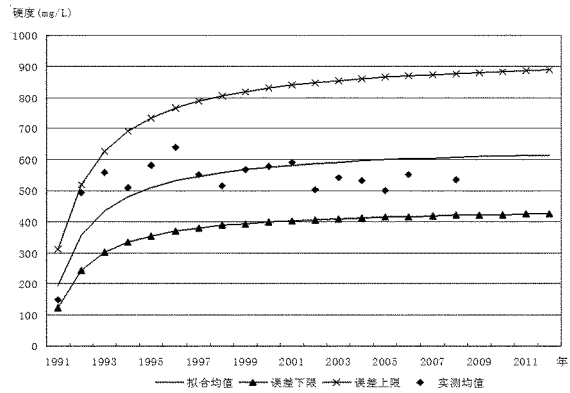
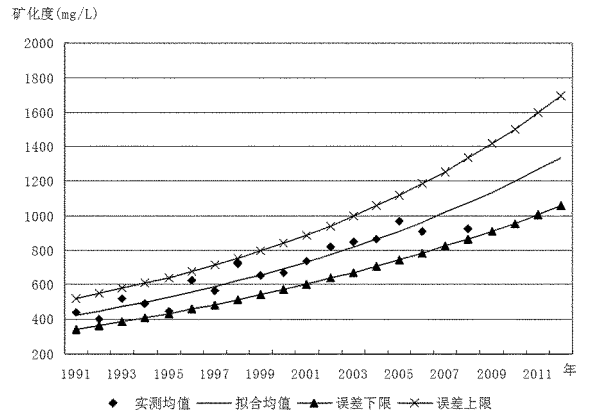
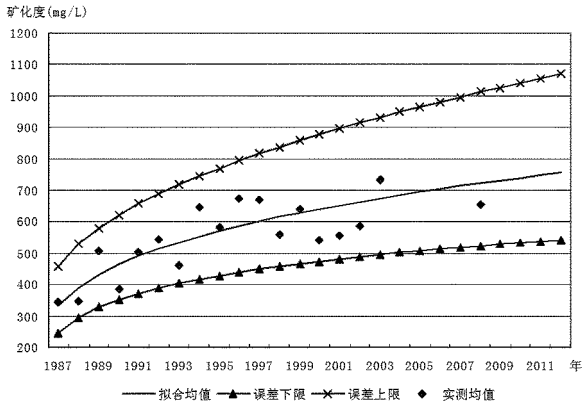


图2 十里泉岩岩溶水主要组分拟合预测值历时曲线

图3 丁庄-东王庄岩岩溶水主要组分拟合预测值历时曲线

### 3 预测评价

地下水水质演化预测是建立在社会经济发展和地下水开采现状基础上,由于预测模型对资料数据的连续性和系列要求较高,目前不具备进行大区域水质预测的条件。该次选取的岩溶水水源地是被以往资料证实水质恶化现象较为严重,具有较强的代表性,但随着经济发展变化或不可预见因素的出现,不同区域的地下水水质演化结果可能会发生新的变化。

依据《地下水质量标准》(GB/T14848-2007)中地下水质量分类指标,对预测水源地的各项组分现状值和预测结果进行评价(表6),对照《生活饮用水卫生标准》<sup>[5,6]</sup>(GB5749-2006),分析评价水源地主要组分含量在未来一定时期内的演化趋势。

表6 典型水源地地下水质量预测评价(mg/L)

水源地/组分	2008		2020		2030		
	实测值	质量类别	预测值	质量类别	预测值	质量类别	
旧县	矿化度	654	Ⅲ	813	Ⅲ	872.7	Ⅲ
	总硬度	370	Ⅲ	469.5	Ⅳ	507.2	Ⅳ
	硫酸根	95.5	Ⅱ	73.1	Ⅱ	77.4	Ⅱ
	硝酸根	108.5	Ⅳ	382.5	Ⅴ	1006	Ⅴ
叶马曹	矿化度	564	Ⅲ	672.5	Ⅲ	722.7	Ⅲ
	总硬度	376.4	Ⅲ	414.8	Ⅲ	449.8	Ⅲ
	硫酸根	149.6	Ⅱ	156.3	Ⅲ	160.2	Ⅲ
	硝酸根	30.7	Ⅲ	40.4	Ⅲ	50.6	Ⅲ
十里泉	矿化度	944	Ⅲ	950.3	Ⅲ	953	Ⅲ
	总硬度	537	Ⅳ	624	Ⅴ	630.3	Ⅴ
	硫酸根	188.1	Ⅲ	184.7	Ⅲ	149.6	Ⅱ
	硝酸根	54.4	Ⅲ	63	Ⅲ	66.5	Ⅲ
渴口岩	矿化度	635	Ⅲ	1828.4	Ⅳ	3344.9	Ⅴ
	总硬度	390	Ⅲ	589.9	Ⅴ	671.2	Ⅴ
	硫酸根	115.5	Ⅱ	180.3	Ⅲ	204	Ⅲ
	硝酸根	60.9	Ⅲ	102.1	Ⅳ	138.9	Ⅴ
丁庄	矿化度	926	Ⅲ	2070.4	Ⅴ	3574.2	Ⅴ
	总硬度	494	Ⅳ	774.2	Ⅴ	893.5	Ⅴ
	硫酸根	325.1	Ⅳ	563	Ⅴ	941.2	Ⅴ
	硝酸根	45.5	Ⅲ	39.8	Ⅲ	43.7	Ⅲ

从泰莱盆地和枣陶盆地岩溶水预测结果来看,2008年5个水源地的矿化度均为Ⅲ类水,至2020年渴口水源地和丁庄-东王庄水源地分别达到Ⅳ类水和Ⅴ类水,2030年渴口水源地也将达到Ⅴ类水。泰莱盆地的两水源地和枣陶盆地的渴口水源地2008年总硬度属Ⅲ类水,十里泉和丁庄-东王庄水源地属Ⅳ类水,至2020年和2030年除莱芜叶马曹

水源地仍能保持Ⅲ类水外,其余水源地均演化为Ⅳ类水或Ⅴ类水,单项指标超过饮用水卫生标准。硫酸根含量在泰莱盆地水源地中变化不大,2008年、2020年、2030年均均为Ⅱ类水或Ⅲ类水,符合饮用水标准;枣陶盆地十里泉水源地呈递减趋势,渴口水源地呈递增趋势,但2008年和预测年内均为Ⅱ类水或Ⅲ类水,而丁庄-东王庄水源地硫酸根含量在2008年就已达Ⅳ类水,至2020年和2030年更是大幅增长,均达到Ⅴ类水。硝酸根含量在泰安旧县和枣庄渴口水源地中演化趋势最为明显,预测年内均将达到Ⅴ类水,尤其是旧县水源地将有大幅度增加,其余水源地增幅较小。

### 4 结语

在经济高速发展、城市和工农业污染加剧的社会背景下,人类活动对地下水环境演化的贡献日益显著,是地下水质量下降的外部环境因素。水源地开采量增加引起水位下降,天然水循环机理、局部地下水动力场发生变化,导致地下水主要组分含量增高,新污染组分易于进入含水系统,加剧地下水水质恶化程度。当水源地开采量减小或停采,水位得到一定程度的恢复后,矿化度、总硬度、硫酸盐等主要组分含量增幅明显减缓或下降,水质又向好的方向发展。可见,水源地外部环境和含水系统内在机理变化是引发水质劣向演化相辅相成的两个方面,是其综合作用的结果。因此,水源地保护应从外部污染源环境治理和岩溶水系统增源控制水位下降两方面进行。

### 参考文献:

- [1] 康凤新,徐军祥,张中祥.山东省地下水资源及其潜力研究[J].山东国土资源,2010,26(8):4-12.
- [2] 马振民,石冰,高宗军.泰安市地下水污染现状及成因分析[J].山东国土资源,2002,18(2):24-28,41.
- [3] 郭劲松,李胜海.龙腾锐.水质模型及其应用研究进展[J].重庆建筑大学学报,2002,24(2):109-115.
- [4] 邓义举,郑丙辉.水质模型参数识别与验证的探讨[J].环境科学与管理,2008,33(5):42-45.
- [5] GB5749-2006.生活饮用水卫生标准[S].
- [6] 王兆林,高宗军,徐源,李涿.济南泉域岩溶水水化学特征[J].山东国土资源,2013,29(2):27-29.

## Predication on Water Quality Evolution of Typical Karst Groundwater Source Area in Shandong Province

ZHANG Zhongxiang<sup>1</sup>, ZHU Zihui<sup>2</sup>, LIU Chuan'e<sup>1</sup>, LUO Fei<sup>1</sup>

(1. Shandong Geo - engineering Exploration Institute, Shandong Jinan 250014, China; 2. No. 4 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Shandong Weifang 261021, China)

**Abstract:** According to monitoring datas of underground water in many years, choosing typical water source areas which have large change in water quality and complete and typical karst groundwater source, adopting the mean value autoregressive model, variation and evolution trend of water quality have been studied. It predicates the evolution trend of water quality will be bad in 2020 and 2030, the contents of key components will be the water standard IV or V in most water source areas, the contents of most single indexes will exceed the hygienic standard for drinking water. In order to prevent the water quality deterioration, it is important to strengthen the external environment protection of water source area and regulate karst water resource quantity.

**Key words:** Predication; karst water; water source areas; model