

# 太原市地下水动态变化特征分析

单利军

(山西省地质环境监测中心,太原 030024)

**摘要:**太原市是北方严重缺水城市之一,由于长期对地下水的超采,诱发了多种环境地质问题。为分析不合理开采条件下地下水的动态演变特征,对研究区近三十年的地下水水位与水质监测数据进行了分析对比,并对地下水的水位与水化学特征及其规律进行了探讨。结果表明:从地下水水位动态特征上分析,浅层孔隙水主要受大气降水的影响,深层孔隙水和岩溶地下水受人类开采活动和自然因素的双重影响;从水化学特征方面分析,随着人类活动的加剧,水质整体呈下降趋势。

**关键词:**超采;动态特征;水位动态;水化学特征

中图分类号:P641

文献标识码:A

## Feature Analysis of Dynamic Variation of Groundwater in Taiyuan City

SHAN Lijun

(Shanxi Geological Environmental Monitoring Center, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** As one of the severely water-deficient cities in the north of China, Taiyuan City has a variety of environmental geological problems due to long-term over-exploitation of groundwater. In order to analyze the dynamic evolution features of the groundwater under the over-exploitation, we analyzed and compared the groundwater levels and water quality monitoring data in the area in recent 30 years, and discussed the water level and water chemistry features and laws. The results show that, in terms of the dynamic features of the groundwater level, shallow pore water is mainly affected by atmospheric precipitation, and deep pore water and karst groundwater are affected by both human mining activities and natural factors. As for water chemistry features, with the increase of human activities, the overall water quality shows a downward trend as a whole.

**Key words:** over-exploitation; dynamic features; water level dynamics; water chemistry features

太原市是北方严重缺水城市之一,人均水资源量为  $173 \text{ m}^3$ ,仅占全国人均量的  $8.4\%$ ,不足全省人均量的  $50\%$ ,水资源的匮乏已明显制约了当地经济的发展。地下水是太原市的重要供水水源,在生活和生产中发挥着重要作用。多年来为满足经济发展的需求,地下水资源长期处于超采状态,太原市已形成多处地下水降落漏斗。随着地下水位大幅度持续下降,区域性降落漏斗逐年扩大与加深,部分地段含

水层已处于疏干、半疏干状态,同时引发地下水水质恶化、泉水断流、地面沉降等一系列环境地质问题的发生<sup>[1-3]</sup>。通过研究地下水的动态演化过程,分析地下水动态变化特征及其规律,可以为地下水合理开采、防灾减灾提供科学依据,具有重要的理论与实际意义<sup>[4-5]</sup>。

在地下水不合理开采条件下分析地下水动态演变特征及其影响因素已成为水文地质研究领域中的

\* 收稿日期:2019-03-10

作者简介:单利军(1970-),男,河北深州人,工程硕士,高级工程师,从事地质资源与地质工程工作。

一个重要方向<sup>[6]</sup>。目前采用的研究方法主要是对地下水水位及水质的数据进行对比、水化学及同位素分析、数值模拟及数学统计方法等,研究成果可以为区域地下水环境的保护与治理工作提供科学指导<sup>[7-8]</sup>。针对太原市地下水开采现状及地下水动态特征,一些学者已经开展过相关的研究<sup>[9-12]</sup>。本文主要在前期研究工作的基础上,选择太原市为研究区,通过系统分析全区地下水水位与水化学资料并与前期历史数据进行对比,确定太原市地下水的动态演化特征及主要影响因素。

## 1 研究区概况

太原市地处晋中斷陷盆地北端,其中北、东、西三面环山,东部属太行山系,西部为吕梁山系,北部为棋子山。中间系汾河冲积物和东西山洪积物构成的断陷盆地,盆地地形开阔平坦。研究区包括太原市六城区(即尖草坪区、杏花岭区、万柏林区、迎泽区、晋源区和小店区)。地形总体上北高南低,东西两侧高中间低,山区向盆地阶梯下降。西山与盆地间地形突变,两者直接相接,边山洪积扇呈裙状起伏,扇小而坡度大。东山向盆地缓慢变化,有宽窄不等的黄土丘陵和台塬。中间为汾河冲积平原区与边山大川入侵的洪积扇,构成宽阔平缓的冲积倾斜平原区。

研究区属温带半干旱大陆性气候,多年平均降水量为 430.9 mm,最大年降水量 652 mm(1996年)。降水量的区域分布规律是北部山区多于南部平川,而且年际间差异较大,年内降水量 70%以上集中于 6 月到 9 月,多年年均蒸发量为 1 187.4 mm。区内地表河流均属黄河流域,汾河为纵贯全区的最大干流,多年平均流速为 9.93 m<sup>3</sup>/s。自 20 世纪 60 年代中期以来,汾河流量总体趋势逐年减少,对太原市地下水的补给产生较大影响。兰村泉和晋祠泉是区内两个流量最大的岩溶泉。但由于地下水长期处于超采状态,兰村泉已于 1988 年干涸,而晋祠泉也于 1994 年出现断流。

根据含水介质的特点和地下水的赋存条件、水力特征、埋藏条件及水位埋深等,研究区内地下水可划分为松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙水、碎屑岩夹碳酸岩类岩溶裂隙水和碳酸盐岩类裂隙岩溶水四种基本类型。本次研究工作主要针对松散岩类孔隙水和碳酸盐岩类裂隙岩溶水两大类进行研究。

### 1.1 松散岩类孔隙水

松散层孔隙水主要夹持于东、西山岩溶水系统

之间,其主要含水层为第四系全新统和更新统的冲洪积层和河湖相地层。根据岩性、赋存特征及补径排条件可划分三个主要含水层岩组:全新统和上更新统为第一含水岩组(又称浅层水,一般埋深小于 50 m);中更新统为第二含水组;下更新统为第三含水组。浅层水分层为潜水、微承压水,将第二、三含水组视为承压水(又称中深层水)。

### 1.2 碳酸盐岩类裂隙岩溶水

该含水组大面积分布于太原东山、西山及北山,或埋藏于太原市盆地区深部。含水层主要为奥陶系中统上、下马家沟组石灰岩,奥陶系下统及寒武系的白云岩、泥质白云岩及白云质灰岩,富水性较差,灰岩岩溶发育程度受岩性、构造、补给与排泄条件的控制而极不均一。奥陶系中统岩溶尤为发育,是太原东西山地区岩溶水的主要含水层,出露有上兰泉、晋祠泉两个大型的岩溶泉。

## 2 地下水水位动态特征

地下水水位动态受降水量、蒸发量、地表河流补给等自然环境和人为因素如井泉开采量、灌溉回渗量的综合影响,并随时间的推移和自然条件的改变而发生变化。

### 2.1 浅层孔隙水水位动态特征

浅层水水位动态主要受大气降水、人工开采、侧向径流等多个因素的影响,总体表现为水位随季节及气象呈周期性变化。一般每年的 3、4 月份,由于降水量较少而农田灌溉需水量增加,致使水位迅速下降一直持续到 6、7 月份。7 月降水量明显增加,相对地下水开采量有所减少,水位出现回升。由于降水入渗的滞后补给及侧向径流的补给作用,使地下水位高水位期一直持续到次年的 1、2 月份。总体上研究区的浅层孔隙水动态类型可概括为以下几种类型。

1)气象径流型主要分布于太原市西部和西北部的黄土丘陵区、冲洪积扇及洪积倾斜平原上部地带,水位埋深 10 m~30 m,不直接受降雨影响,其主要补给来源为山区地下水径流。地下水位升降变化受上半年降水量大小的影响,通常水位变化幅度小,水位曲线平缓。观测孔最高水位出现在 12 月至次年 3 月,最低水位出现在 7 月到 9 月。

2)气象灌溉型主要分布于倾斜平原下部,水位动态受季节性灌溉控制,降雨补给为次要因素,其特征是年内水位呈缓慢上升趋势,上升幅度不等。总体上高水位出现在 8 月到 10 月,低水位在 3 月到 4

月,年内变化幅度为 0.2 m~1.0 m,年际水位变化呈缓慢上升趋势。

3) 开采径流型主要分布于黄土丘陵和洪积扇区。该区浅层水开采量较小,但存在浅层水向下渗漏补给深层水,导致浅层水水位下降。随着深层水降落漏斗的扩大与加深,使浅层水下渗越流补给速度加剧,以致于浅层水水位大幅度下降,浅层含水层大面积被疏干,浅井大量报废。

4) 开采气象型主要分布于距汾河 2 km 以外的广大倾斜平原区,水位埋深一般在 2 m~15 m,地下水水位动态主要受开采量与降水量控制,用水季节开采量增大,水位下降。雨季过后,水位回升,最高水位与降雨季节相吻合。

5) 开采水文型主要分布于汾河冲积平原区,水位埋深一般小于 5 m,水位动态主要受降水、汾河流量、春灌解冻和开采的影响,一般每年出现 2 次水位高峰,12 月至次年 1 月水位最低。总体上地下水水位动态较为稳定,每年呈有规律的波状周期变化,年水位变幅较小。

## 2.2 深层孔隙水水位动态特征

深层水含水层岩性主要为第四系中、下更新统洪积、冲积、冲湖积砂卵石、砂层等,含水层底板埋深 7 m~350 m。深层水水位动态主要受侧向径流、浅层水向下越流补给和人工开采的综合制约,水位变化不直接受降水和蒸发的影响。按其动态特征可划分为开采下降型和开采径流型两种类型。

1) 开采下降型主要分布于冲积平原区和倾斜平原中下部大部分地区,水位动态受开采量大小的控制,自然因素对地下水水位作用微弱。4 月份以后由于地下水开采量迅速增大,地下水水位出现明显的下降趋势,至 7 月降至水位最低点。进入雨季之后由于降水量的增多,开采量的减少,水位出现回升。

2) 开采径流型主要分布于东、西山倾斜平原中部,水位动态主要受地下径流和人类开采双重影响。水位一般滞后雨季一个月左右开始上升,反映了地下水运动以水平径流为主。

## 2.3 岩溶水水位动态特征

研究区岩溶水主要分布于西山和东山两大区域,主要开采的是奥陶系马家沟组的岩溶水。据多年监测结果可按其动态特征划分为开采下降型和开采径流型两种类型。

1) 开采下降型主要分布于枣沟、兰村水源及三给地垒的岩溶水集中开采区,地下水动态主要受岩溶水开采量大小的影响。

2) 径流开采型主要分布在水源地边缘地段或两水源地交接地段,受岩溶水开采量和地下径流的双重影响,动态曲线呈波状起伏,有升有降。

## 2.4 影响地下水水位动态主要因素分析

研究区地下水水位动态在天然状态下受大气降水和蒸发控制,但在开采条件下,则同时受自然与人为因素的影响。总体上,地下水水位动态主要受开采和降水两个主要因素的影响:在雨季降水量多而开采量小,地下水水位往往呈现回升趋势;枯水期降水量明显减少,而开采量大,地下水水位又出现下降趋势;在部分地区由于集中过量开采地下水,已形成明显的降落漏斗。

降水量是地下水的主要补给来源,降水量的大小直接或间接影响地下水水位的升降变化,其中尤以浅层水影响最为明显。区内年内降水主要集中于每年的 6 月到 8 月,一般年份从 5 月开始降水逐渐增多,到 7 月出现降水高峰,之后降水逐渐减少。因此浅层水水位从 6 月开始水位升高,到 8 月出现最高水位,之后水位逐渐降低。在降水量偏少的月份,其地下水水位也偏低,水位动态与降水动态极其相似。这充分显示了降水对地下水水位动态的影响特征。

地下水开采是地下水的主要消耗途径之一,开采量的大小直接影响地下水水位的升降变化。据资料统计,近几十年来,降水量整体偏少,而 80 年代以来太原市地下水开采量呈递增趋势,过量抽取地下水使地下水资源得不到有效的补给和恢复,从而造成区域地下水水位总体呈下降趋势。

2003 年以来,黄河水引入太原,地表水替代地下水。太原市采取了关停自备井、禁采地下水和循环利用等“关井压采”措施,减少了地下水开采量,累计关闭自备井 396 眼,压缩地下水开采量 35.3 万  $\text{m}^3/\text{d}$ 。地下水水位下降的趋势得到遏制,开始平稳回升。2008 年 2011 年,太原市松散岩类孔隙承压水水位每年平均上升约 1 m,汾河两岸回升明显,年平均上升 3 m~4 m,最高回升 16.17 m。2014 年以后年际变化较小,承压水水位基本稳定。

## 3 地下水水质动态特征

近年来,由于地下水的开采深度不断增加,本次浅层水的水质分析主要针对西张—太钢水源地和几个重点污染地段,而对深层水和岩溶水的分析主要从水源地角度进行分析。

## 3.1 浅层水水质动态

表 1 所示。

浅层地下水监测点的主要离子含量统计结果如

表 1 浅层地下水监测点主要离子含量统计

Table 1 Major ions concentration of groundwater in the shallow aquifers

(mg · L<sup>-1</sup>)

项目	监测点位							
	西张—太钢水源地		北堰		武家庄		小站	
	1983 年	2011 年	1982 年	2011 年	1984 年	2011 年	1982 年	2011 年
TDS	330	570	630	950	3 350	3 360	800	2 620
K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup>	62.8	78.3	94.9	72.5	301.5	527	31.4	186.9
Ca <sup>2+</sup>	65.5	74.1	156.3	176	452.9	396	136.8	504
Mg <sup>2+</sup>	37.3	35.9	66.9	76.6	262.6	192	64.8	102
Cl	36.9	142	149.8	359	384.6	909	17.7	76.2
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	132.1	127	302.6	139	1 582.5	1 081	377	1 590
HCO <sub>3</sub>	318.5	223	349.3	247	736.5	500	353.9	323

## 3.1.1 西张—太钢水源地

西张—太钢水源地水化学类型由 1983 年 HCO<sub>3</sub> · SO<sub>4</sub>—Ca · Mg · Na 型水转变为 2011 年 Cl · HCO<sub>3</sub> · SO<sub>4</sub>—Ca · Na · Mg 型水,矿化度也由 0.33 g/L 增加到 0.57 g/L。主要离子含量中变化较大的为:Cl 增加了 105.1 mg/L, HCO<sub>3</sub> 减少了 95.5 mg/L。1983 年到 2011 年该水源地一直为 III 类水,但水质总体呈下降趋势。

## 3.1.2 重点污染地段

1) 北堰监测点。位于太原化工区,1982 年水化学类型为 SO<sub>4</sub> · HCO<sub>3</sub>—Ca · Mg 型,矿化度 0.63 g/L,2011 年地下水类型为 Cl—Ca · Mg 型,矿化度 0.95 g/L。从表 1 中可以看出,主要离子含量中变化较大的 Cl 增加了 209.2 mg/L, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 减少了 163.6 mg/L, HCO<sub>3</sub> 减少了 102.3 mg/L。1982 年到 2011 年地下水始终为 V 类水,多次检出酚超标,地下水持续受到污染。

2) 武家庄监测点。位于晋阳湖北部,地下水由

1984 年 SO<sub>4</sub>—Ca · Mg 型水,矿化度 3.35 g/L,转变为 2011 年 Cl · SO<sub>4</sub>—Ca · Na · Mg 型水,矿化度 3.36 g/L。从表 1 中可以看出,1984 年有溶解总固体、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl、Na<sup>+</sup> 四项超标,至 2011 年总硬度、溶解总固体、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl、Na<sup>+</sup> 五项超标,水质呈持续恶化。综合评价该范围浅层水为 V 类极差水,地下水属重度污染。

3) 小站监测点。位于晋阳湖南部,水化学类型由 1982 年 SO<sub>4</sub> · HCO<sub>3</sub>—Ca · Mg 型水,矿化度 0.8 g/L,转变为 2011 年 SO<sub>4</sub>—Ca 型水,矿化度 2.62 g/L。从表 1 中可以看出,1982 年 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量 377 mg/L,为 V 类水,至 2011 年 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、总硬度、溶解总固体三项超标,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量增加 1 213 mg/L,水质持续恶化,属重度污染,综合评价为 V 类水。

## 3.2 深层水水质动态

深层地下水监测点的主要离子含量统计结果如表 2 所示。

表 2 深层地下水监测点主要离子含量统计

Table 2 Major ions concentration of groundwater in the deep aquifers

(mg · L<sup>-1</sup>)

项目	监测点位							
	西张—太钢水源地		西山地区		南屯化工水源地		北营地区	
	1983 年	2011 年	1983 年	2011 年	1982 年	2011 年	1982 年	2011 年
TDS	190	380	600	810	420	420	530	520
K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup>	14.3	22.5	39	34.3	65.8	51.1	115.6	105.7
Ca <sup>2+</sup>	69.5	79.2	125.3	187	67.1	61.1	51.1	53.3
Mg <sup>2+</sup>	25.5	31.6	38.3	43.2	21.3	24.9	28.9	29.2
Cl	9.9	29.4	26.6	86.9	26.6	62.4	72.7	65.9
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	26.4	60	211.1	329	60	124	117.7	106
HCO <sub>3</sub>	314.3	320	323.4	262	360	195	289.9	325

## 3.2.1 西张—太钢水源地

西张—太钢水源地,1983 年水化学类型为 HCO<sub>3</sub>—Ca · Mg 型水,矿化度 0.19 g/L,2011 年水化学类型为 HCO<sub>3</sub>—Ca · Mg 型水,矿化度 0.38 g/L。主要离子含量均有所增加,其中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量增加

33.6 mg/L, Cl 含量增加 19.5 mg/L。地下水由 1983 年的 II 类水下降为 2011 年的 III 类水,水源地水质受到污染。

## 3.2.2 西山地区

西山地区水化学类型由 1983 年的 HCO<sub>3</sub> ·

SO<sub>4</sub>—Ca·Mg 型水,矿化度 0.60 g/L,转变为 2011 年的 SO<sub>4</sub>·HCO<sub>3</sub>—Ca 型水,矿化度 0.81 g/L, Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量有较大增加。从表 2 中可以看出,1983 年各项指标均不超标,2011 年超标项目主要为总硬度、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,水质变差,综合评价为 V 类水,作为饮用水源时,应先作处理。

### 3.2.3 南屯化工水源地

南屯化工水源地水化学类型由 1982 年的 HCO<sub>3</sub>—Ca·Na 型水,矿化度 0.42 g/L,转变 2011 年的 HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>—Ca·Na·Mg 型水,矿化度 0.42 g/L。从表 2 中可以看出,1982 年到 2011 年,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量增加了 64 mg/L,Cl 含量增加了 35.8 mg/L,其余项目离子含量变化不大。总体上地下水

水质呈下降趋势,单各项指标均未超标。

### 3.2.4 北营地区

北营地区水化学类型由 1982 年的 HCO<sub>3</sub>—Na·Ca 型水,矿化度 0.53 g/L,转变为 2011 年的 HCO<sub>3</sub>—Na·Ca 型水,矿化度 0.52 g/L。从表 2 中可以看出,1982 年到 2011 年间,各离子含量变化不大,水质动态基本稳定。但是该区范围内的地下水中氟化物含量较高,1982 年 F 含量 1.6 mg/L,2011 年 F 含量 1.13 mg/L,为 F 单项超标地下水,水质评价为 IV 类。

### 3.3 岩溶水水质动态

岩溶地下水监测点的主要离子含量统计结果如表 3 所示。

表 3 岩溶地下水监测点主要离子含量统计

Table 3 Major ions concentration of groundwater in the karst groundwater monitoring stations

(mg·L<sup>-1</sup>)

项目	监测点位					
	上兰水源地		枣沟水源地		晋祠泉	
	1982 年	2011 年	1992 年	2011 年	1982 年	2011 年
TDS	270	350	180	200	840	930
K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup>	13	27.3	10.92	11.8	20.5	26.8
Ca <sup>2+</sup>	62.1	65.1	80.2	34.1	117.7	190
Mg <sup>2+</sup>	19.5	24.9	10.9	21.3	35.3	52.9
Cl	8	29.4	7.1	10.3	16.8	22.7
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	28.8	77.8	37	23.1	253.9	531
HCO <sub>3</sub>	268.5	244	276	193	233.4	214

#### 3.3.1 上兰水源地

上兰水源地水化学类型为 HCO<sub>3</sub>—Ca·Mg 型水,1982 年矿化度 0.27 g/L,2011 年矿化度 0.35 g/L,为 III 类水。从表 3 中可以看出,1982 年到 2011 年,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量增加了 49 mg/L,增长了 170%,Cl 含量增加了 21.4 mg/L,增长了 268%,2011 年检出 NO<sub>2</sub> (0.107 mg/L),且总硬度、溶解总固体均有较大幅度增加,地下水受到污染,水质呈下降趋势。

#### 3.3.2 枣沟水源地

枣沟水源地水化学类型由 1992 年 HCO<sub>3</sub>—Ca 型水,矿化度 0.18 g/L,转变为 2011 年 HCO<sub>3</sub>—Mg·Ca 型水,矿化度 0.2 g/L。从表 3 中可以看出,总体上主要离子含量中 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 有较大变化幅度,Ca<sup>2+</sup> 减少 58%、Mg<sup>2+</sup> 增加 95%、Cl 增加 45%、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 减少 38%。但总体上离子含量绝对数量水平仍然较低,水质优良,为 II 类水。

#### 3.3.3 晋祠泉

晋祠泉现为人工回灌水,水化学类型由 1982 年 SO<sub>4</sub>·HCO<sub>3</sub>—Ca·Mg 型水,矿化度 0.84 g/L,转变为 2011 年 SO<sub>4</sub>—Ca·Mg 型水,矿化度 0.93 g/L。从表 3 中可以看出,1982 年到 2011 年除 HCO<sub>3</sub> 减少

19.4 mg/L 外,其余均有所增加,1982 年 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、F 含量超标,为 IV 类水。2011 年,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>2</sub>、总硬度和溶解总固体四项指标超标,为 V 类水,水质有进一步恶化趋势。

## 4 结论

1)从浅层地下水水位动态上看,洪积倾斜平原和冲积倾斜平原区水位动态主要受大气降水的影响,个别地段由于受深层地下水开采的影响,对深层地下水有越流补给作用。从水质特征上看,浅层水西张—太钢水源地水质为 III 类,水质较好。重点污染地段水质均为 V 类,污染严重,水质整体呈下降趋势,因此保护和合理利用浅层地下水资源问题仍然十分严峻。

2)从深层地下水水位动态特征上分析,深层水的动态类型受开采和地下径流双重影响,动态曲线呈波状起伏,开采量大时,水位下降,反之,水位回升。从水质上分析,深层水西张—太钢水源地水质较好,化工水源地次之,西山最差。通过近三十年深层地下水水质动态特征监测,深层地下水水质总体呈下降趋势,应继续加强深层地下水的保护工作。

3)从岩溶水水位动态特征上分析,受开采和地

下径流双重影响,岩溶水水位动态曲线呈波状起伏,近年来人类活动的加剧,水质呈下降趋势,尤其是晋总体呈下降趋势。从水质上看,因其埋藏较深、不易受地表水及人类活动影响整体上水质较好。但由于

近年来人类活动的加剧,水质呈下降趋势,尤其是晋祠泉水质很差,应继续加大治理工作的力度。

#### 参考文献:

- [1] 韩颖.大同盆地地下水流场、水化学场变化特征[J].地质调查与研究,2008,31(2):138-146.  
HAN Ying. Characters of the Groundwater Flow Field and Hydrochemistry Field in Datong Basin[J]. Geological Survey and Research, 2008, 31(2): 138-146.
- [2] 王雅捷,王国卿,郝永红,等.人类活动对柳林泉域水文过程影响研究[J].水文,2011,31(3):82-87.  
WANG Yajie, WANG Guoqing, HAO Yonghong, et al. Effect of Human Activities on Hydrological Process of Liulin Springs [J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(3): 82-87.
- [3] 郝振纯,闫龙增,鞠琴,等.山西省盆地2006—2010年地下水动态分析[J].人民黄河,2014,36(6):90-96.  
HAO Zhenchun, YAN Longzeng, JU Qin, et al. Analysis of Groundwater Dynamic During the Period of 2006-2010 in Shanxi Province Basins[J]. Yellow River, 2014, 36(6): 90-96.
- [4] 凤蔚,祁晓凡,李海涛,等.雄安新区地下水水位与降水及北太平洋指数的小波分析[J].水文地质工程地质,2017,44(6):1-8.  
FENG Wei, QI Xiaofan, LI Haitao, et al. Wavelet Analysis Between Groundwater Level Regimes and Precipitation, North Pacific Index in the Xiongan New Area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(6): 1-8.
- [5] 张伟敬,孙晓明,柳富田,等.曹妃甸地区地下水水化学特征及影响因素的R型因子分析[J].安全与环境工程,2010,17(1):1-5.  
ZHANG Weijing, SUN Xiaoming, LIU Futian, et al. Application of R-mode Analysis on Chemical Characters and Influential-Factors of Quaternary Groundwater in Caofeidian Area[J]. Safety and Environmental Engineering, 2010, 17(1): 1-5.
- [6] 王仕琴,宋献方,王勤学,等.华北平原地下水水位微动态变化周期特征分析[J].水文地质工程地质,2014,41(3):6-12.  
WANG Shiqin, SONG Xianfang, WANG Qinxue, et al. Analysis of Period Features of Groundwater Micro-dynamics in the North China Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(3): 6-12.
- [7] 袁建飞,邓国仕,徐芬,等.西昌市尔乌泉域泉水水文地球化学特征及成因[J].水文地质工程地质,2017,44(4):15-22.  
YUAN Jianfei, DENG Guoshi, XU Fen, et al. Hydrogeochemical Characteristics and Genesis of Springs in the Catchment Area of the Erwu Spring of Xichang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(4): 15-22.
- [8] 曹文洁,肖长来,梁秀娟,等.RBF神经网络在地下水动态预测中的应用[J].水利水电技术,2018,49(2):43-48.  
CAO Wenjie, XIAO Changlai, LIANG Xiujian, et al. Application of RBF Neural Network for Groundwater Dynamic Prediction[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(2): 43-48.
- [9] 吕路,杨军耀.过度开采对地下水水化学特征的影响研究[J].长江科学院院报,2017,34(9):14-18.  
LV Lu, YANG Junyao. Effect of Over Exploitation of Groundwater on the Hydrochemical Characteristics of Groundwater[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(9): 14-18.
- [10] 臧红飞.柳林泉域岩溶地下水水文地球化学特征及演化规律研究[D].太原:太原理工大学,2015.  
ZANG Hongfei. Hydrogeochemical Characteristics and Evolution Rules of Karst Groundwater in the Liulin Spring Area[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [11] 文冬光,沈照理,钟佐燊.地球化学模拟及其在水文地质中的应用[J].地质科技情报,1995,14(1):99-104.  
WEN Dongguang, SHEN Zhaoli, ZHONG Zuoshen. Geochemical Modeling and Its Applications in Hydrogeology[J]. Geological Science and Technology Information, 1995, 14(1): 99-104.
- [12] 乔小娟,李国敏,都洁,等.太原市西山岩溶水系统水文地球化学特征分析[J].中国岩溶,2008,27(4):353-357.  
QIAO Xiaojuan, LI Guomin, DU Jie, et al. Hydrochemical Features of Xishan Karst Groundwater System in Taiyuan[J]. Carsologica Sinica, 2008, 27(4): 353-357.

(编辑:樊敏)