

唐春雷, 晋华, 梁永平, 等. 娘子关泉域岩溶地下水位变化特征及成因[J]. 中国岩溶, 2020, 39(6): 810-816.
DOI: 10. 11932/karst2019y31

娘子关泉域岩溶地下水位变化特征及成因

唐春雷^{1,2,3}, 晋华¹, 梁永平^{2,3}, 赵春红^{2,3}, 申豪勇^{2,3}, 潘尧云⁴, 景泽⁵

(1. 太原理工大学, 太原 030024; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004; 4. 山西省第二地质工程勘察院, 山西 侯马 043000; 5. 山西省地质调查院, 太原 030006)

摘要: 利用多年观测资料, 结合地下水补、径、排条件, 分析娘子关岩溶地下水动态变化特征及成因。结果表明: (1) 娘子关泉群流量在1980-2004年前总体表现为下降状态, 2004年之后趋于稳定并略有回升; (2) 岩溶地下水位动态空间上表现为地下水补给区比径流区变化大, 时间上则分为两个不同时间段: 1980-2004年表现为持续下降状态, 2005-2014年表现为波动缓慢下降, 部分地区水位小幅回升; 龙庄岩溶地下水1998年1月到2004年1月水位下降22.9 m, 平均年变幅3.82 m, 2005年5月到2014年5月水位升高1.5 m, 年均变化-0.17 m。

关键词: 娘子关泉域; 地下水位; 时空变化; 动态监测; 成因

中图分类号: P641 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2020)06-0810-07 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

地下水动态是地下水水位、水量、水温、水质等要素随时间和空间所发生的变化现象和过程。研究地下水动态与平衡, 不仅有助于了解地下水的形成机制、运动与变化规律, 也对合理开发利用、评价和预测预报地下水资源都具有重要意义^[1]。娘子关泉出露于阳泉市平定县娘子关镇, 多年平均流量为 $9.81 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。娘子关泉是中国北方最大的岩溶泉。娘子关岩溶地下水以水量集中稳定、水质良好成为阳泉市工农业生产及城市供水的重要水源^[2-3]。数十年来, 阳泉市区、平定县、盂县县城的城市供水、阳煤集团生活用水以及与煤炭相关的能源化工企业生产供水主要依靠岩溶地下水。岩溶地下水支撑了阳泉市多年来社会高速发展及能源基地建设, 是阳泉市的生命水源^[4-5]。近30年来, 在气候变化、人类活动

强度加大的背景下, 娘子关泉水流量呈趋势性衰减、区域岩溶地下水位持续下降, 水质污染并不断恶化等一系列岩溶水环境问题凸显, 加剧了水资源需求日趋紧张的状况^[6-8]。通过地下水动态的分析, 可了解人类活动和气候条件对地下水系统的影响程度、变化趋势和变化幅度等^[9]。本文通过分析娘子关岩溶地下水的动态变化规律及其特征, 并探讨成因, 以期为合理开发地下水资源、发展区域经济提供科学依据。

1 研究区概况

娘子关泉域位于山西省东部, 涉及阳泉市的城区、郊区、平定县、盂县, 晋中市的昔阳、和顺、左权、寿阳及榆次市, 太原市区及阳曲县10个市(县、区), 东部边界与河北省毗连(图1), 全区总面积为 $7\,217 \text{ km}^2$ ^[10-13]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672253); 阳泉市政府财政项目(SXZK-20190602-F03-01); 中国地质科学院基本科研项目(2020010)

第一作者简介: 唐春雷(1984-), 男, 助理研究员, 主要从事岩溶水文地球化学、岩溶生态环境修复工作。E-mail: tangchunlei@karst.ac.cn。

通信作者: 晋华(1969-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源、矿山环境地质研究。E-mail: jinhua@tyut.edu.cn。

收稿日期: 2019-07-22

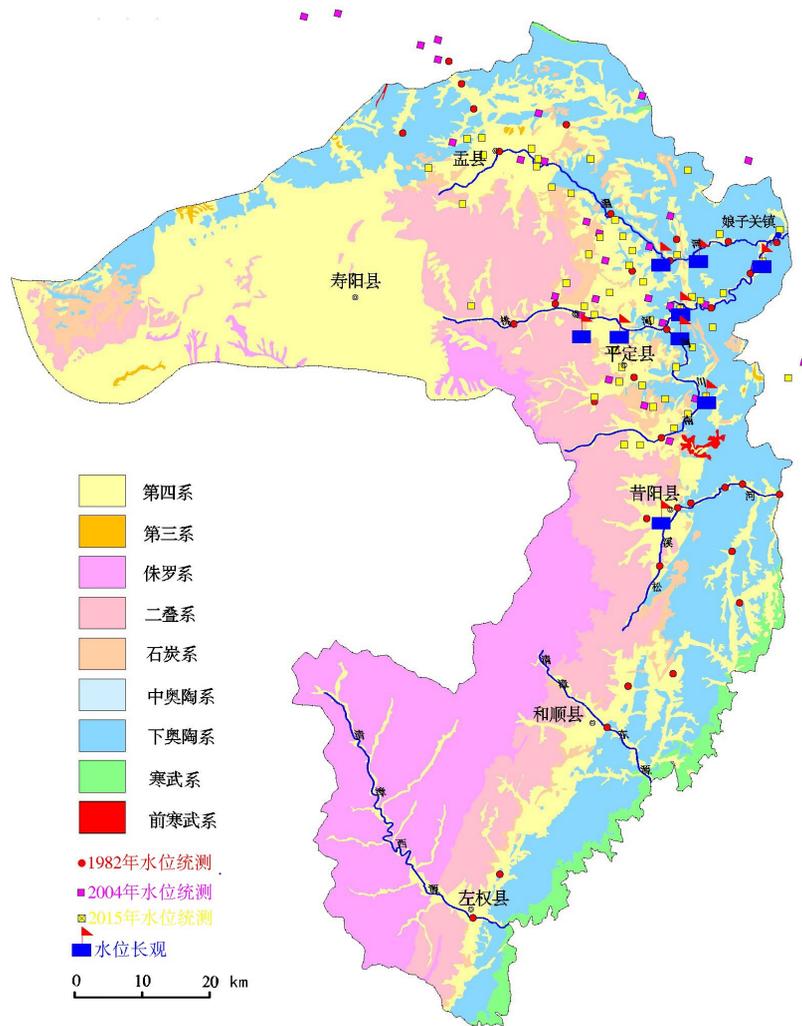


图 1 娘子关泉域岩溶地下水位统测及长观位置图

Fig. 1 Map showing karst groundwater level system and location of long-term observation in Niangziguan spring area

1.1 气象与水文

娘子关泉域内多年平均水面蒸发量为 1 202 mm (2601 型蒸发器值), 多年平均气温为 10.9 °C, 1 月份平均气温为 -4.6 °C, 极端最低气温为 -28 °C; 全区多年 (1955-2014) 平均降水量为 542.26 mm。泉域内除潇河属黄河流域的汾河水系外, 其余河流均属海河流域的子牙河水系, 其中较大的支流有温河、桃河、绵河 (温河、桃河汇流后称绵河)、松溪河、清漳东源、清漳西源、洪水河等, 潇河的主要支流有白马河、龙门河、涧河。

1.2 岩溶地下水补、径、排条件

1.2.1 补给

(1) 大气降水直接入渗补给。在碳酸盐岩裸露区降水入渗是岩溶地下水的主要补给来源。

(2) 河流渗漏补给。娘子关泉域内从北向南发

育有温河、桃河、南川河、松溪河、清漳河 5 条东西向河流, 各河流接受西部碎屑岩区产流后向东进入碳酸盐岩裸露区发生渗漏补给岩溶地下水。其他补给来源主要为碳酸盐岩裸露区的大石门水库、油瓮水库对岩溶地下水产生的渗漏补给。此外, 还有各河流上游碎屑岩区的产流在碳酸盐岩裸露区的入渗补给。

1.2.2 径流与排泄

娘子关岩溶地下水径流方向从平面上看就是围绕北部、南部与中部 3 条“丫”字型岩溶地下水强径流带汇集, 向娘子关方向运移, 在强径流带及两侧形成了岩溶地下水的富水区。绵河对地表的下切塑造, 使得娘子关一带从地形上构成泉域内最低点, 同时也是泉域奥陶系岩溶地下水含水层出露的最低点。泉域内岩溶地下水接受降雨、河流补给后, 在重力驱

动作用下,由北、西、南三面向娘子关一带径流汇集,受苇泽关断层阻隔出露成泉群^[14-17]。

1.3 岩溶地下水动态监测网分布

中国地质科学院岩溶地质研究所与山西阳泉市水利局、山西阳泉市娘子关泉域管理处,于1982年,2004年、2015年进行3次水位统测工作(图1),在此基础上搜集山西阳泉水文局长观系列资料。

2 娘子关泉水流量衰减特征

2.1 年季动态

娘子关泉群泉水量具有很强的调节性,天然条件下泉水流量的不稳定系数小于2,是稳定性泉水。但由于近数十年的大规模开采等人为影响,泉水流

量呈现出明显的衰减趋势。20世纪80年代前的多年平均流量为 $12.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,80年代到90年代的流量为 $8.93 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,而21世纪以来的平均流量仅为 $6.66 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,接近于早期的一半,到2007年以后趋于稳定。泉水流量年内动态主要受降水的影响,但具有一定的滞后效应,由图2可知,流量在5月最小,之后随着雨季来临开始增加,从8月份以后有一个明显回升过程,到次年2月份后急速下降,其原因除了降水以外,春夏季用水量增加也是一个重要因素。

对比1956–1979年、1980–2000年、2001–2015年3个时期,分别分析各种泉水流量衰减的因素。由娘子关泉水流量观测资料可知,前后3期的平均流量分别是 $12.60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $8.30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $6.66 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,相对减少 $4.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.64 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

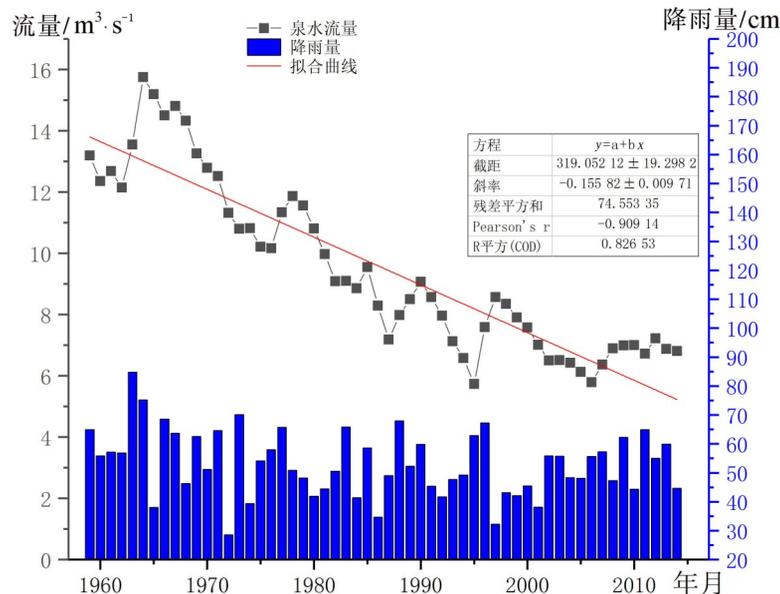


图2 娘子关泉水流量与降雨量动态曲线图

Fig. 2 Curves of spring water flow and rainfall variation in Niangziguan spring

2.2 年内动态变化

将娘子关泉水1959–2015年月平均流量曲线分为两个时间段:1959–1979年,1980–2015年。在1959–1979年娘子关泉水月平均流量曲线中,其年内动态有一个波峰一个波谷,波峰在11月份 $13.05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,然后呈下降趋势,直到第二年6月份 $12.05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。其泉水流量动态的成因主要与泉域岩溶地下水的补给有关,降水入渗补给是峰值动态的直接原因(图3)。

在1980–2015年月平均流量曲线中,其年内动态大致可分出2个峰值,其一是7–9月主峰值,流量

从5月份的 $7.27 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 呈起伏状增加到9月的 $7.73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,峰谷流量相差 $0.46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;第二是1月的次峰值,泉水流量到达9月峰值后,10月出现减少,11月回升,在次年1月份达到一个峰值,此后有开始衰减,峰值的峰谷流量差仅 $0.13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (图3)。泉水流量动态的成因主要与岩溶地下水的补给有关,近距离河流入渗补给与远距离裸露区降雨入渗补给时间、空间差是形成峰值动态的直接原因。此外,泉域内岩溶地下水在不同季节需水量的不稳定开采也会影响泉水流量动态曲线形态,1959–1979年在泉域内没有岩溶地下水开采时期的流量动态更加稳定,其快

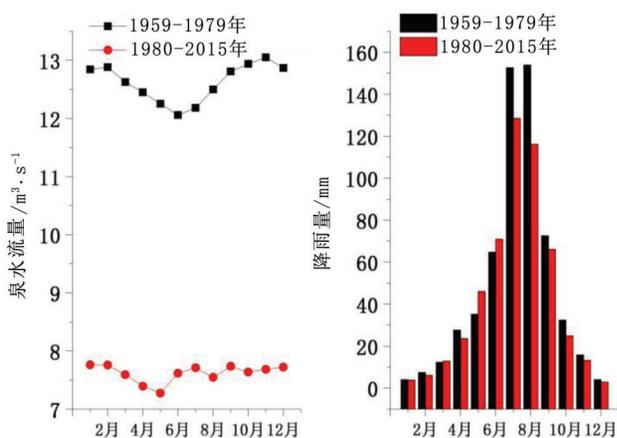


图3 不同时期泉水月均流量与降雨量动态图

Fig. 3 Charts of monthly average flow of spring water and rainfall variation in different periods

速下降与波状上升即与降雨入渗补给、河道入渗补给有关。

1959-1979年年均降雨为583.43 mm(阳泉站), 1980-2015年均降水量为515.62 mm(阳泉站), 两者相差1.13倍, 但是地表径流量却相差较大, 以阳泉水文站为例年均水量相差1.91倍, 而罗面嘴水文站则相差2.95倍(图4)。其主要原因是人工开采的增加, 土地利用类型的改变及水利工程的建设等。罗面嘴水文站上游修建了小型水坝、水柜用于农业灌溉, 2004年以后地表径流几乎为0。地表径流减少、人工开采增加是泉水衰减、地下水位降低的主要原因。

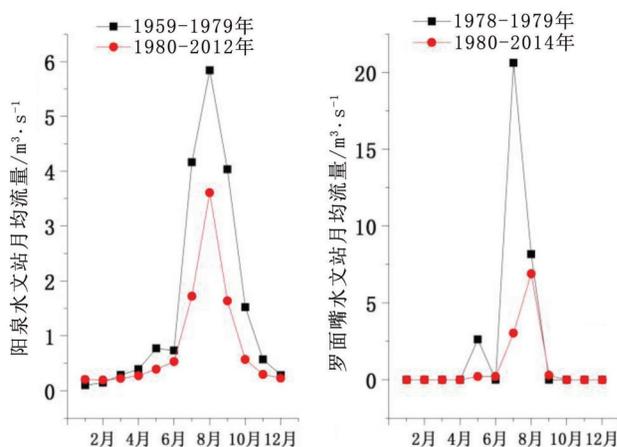


图4 不同时期水文站月均流量动态图

Fig. 4 Charts of monthly average flow variation of hydrological station in different periods

3 岩溶地下水水位变化特征及原因

地下水动态是地下水的数量和质量在降水、地

表径流等自然因素和人类开采活动等人为因素共同影响下随时间的变化过程。娘子关岩溶地下水水位动态变化主要表现为时间、空间上的差异。

3.1 空间差异

空间上表现为地下水补给区比径流、排泄区变化大。补给区昔阳岩溶地下水水位从1980年5月到1988年5月, 岩溶地下水水位下降56.2 m, 年变幅为7.03 m; 径流区上董寨1977年8月到2004年6月岩溶水位下降40.0 m, 年变幅为1.48 m; 化工厂从1998年5月到2004年5月岩溶水位下降18.7 m, 年变幅为3.12 m。排泄区程家岩溶地下水水位从1980年4月到2003年7月岩溶水位下降7.7 m, 年变幅为0.33 m。

3.2 时间序列

时间上分为两个时间阶段: 1980-2004年, 与2005-2014年。1980-2004年表现为持续下降状态。龙庄岩溶地下水1998年1月到2004年1月, 岩溶地下水水位下降22.9 m, 平均年变幅为3.82 m。大石门岩溶地下水1998年5月到2006年5月, 岩溶地下水水位下降41.5 m, 平均年变幅为5.18 m。南坪岩溶地下水1997年4月到2004年5月, 水位标高由407.8 m到402.6 m, 年均变化为0.73 m(表1)。2005-2014表现为波动稳定状态。龙庄岩溶地下水2005年5月到2014年5月, 水位标高由411.7 m到413.2 m, 年均变化-0.17 m。大石门岩溶地下水2007年5月到2014年5月, 水位标高由452.8 m到439.7 m, 年均变化1.87 m。南坪岩溶地下水2005年5月到2014年5月, 水位标高由408.6 m到409.5 m, 年均变化-0.10 m(表1)。

1980-2004年长观点总计年均降幅为2.58 m; 2005-2014年年均降幅为-0.09 m。1980-2004年降幅较大, 其原因是由于1980-2004年水位持续降低、多年持续开采累计效果所致; 2005-2014年水位稍许回升是因为降雨量增加, 阳泉市、平定县泉口提水工程的建设。

3.3 年内动态

排泄区(程家、磨河滩孔)、径流带汇流区(上董寨、会理孔)、补给区(跃进煤矿、昔阳)年内动态特点: 首先年内动态与年季动态相一致, 补给区、排泄区水位变幅较小; 其次排泄区程家孔和磨河滩孔接近, 均在上升过程中出现阶梯状增长, 到年末11月或12月上升到峰顶, 分析认为阶梯的第一阶上升段与

表1 娘子关泉域奥陶系岩溶地下水水位降幅对比表(m)
Table 1 Comparison of decline amplitudes of Ordovician karst groundwater level in Niangziguan spring area (m)

1980—2004								
位置	初期时间	末期时间	初期	末期	降幅	间隔年数	年平均降幅	阳泉站降雨量/mm
上董寨	1977年8月	2004年6月	413.00	373.00	40.00	27	1.48	
程家	1980年4月	2003年7月	409.10	401.40	7.70	23	0.33	
龙庄	1998年1月	2004年1月	429.00	406.10	22.90	6	3.82	
会理	1998年1月	2004年1月	396.00	390.10	5.90	6	0.98	
化工厂	1998年5月	2004年5月	397.80	379.10	18.70	6	3.12	
南坪	1997年4月	2004年5月	407.80	402.60	5.10	7	0.73	
昔阳	1980年5月	1988年5月	555.50	499.26	56.20	8	7.03	
大石门	1998年5月	2006年5月	459.64	418.18	41.50	8	5.19	
化肥厂	1981年4月	2003年4月	422.00	400.00	12.70	22	0.58	
平均							2.58	500.89
2005—2014								
位置	初期时间	末期时间	初期	末期	降幅	间隔年数	年平均降幅	阳泉站降雨量/mm
上董寨	2005年5月	2014年5月	373.20	377.81	-4.70	9	-0.52	
程家	2005年5月	2014年5月	403.30	406.90	-3.60	9	-0.40	
龙庄	2005年5月	2014年5月	411.70	413.19	-1.50	9	-0.17	
会理	2005年5月	2014年5月	390.70	393.70	-3.00	9	-0.33	
化工厂	2005年5月	2014年5月	379.10	387.60	-8.50	9	-0.94	
南坪	2005年5月	2014年5月	408.60	409.50	-0.90	9	-0.10	
大石门	2007年5月	2014年5月	452.84	439.73	13.10	7	1.87	
平均							-0.09	542.76

河流渗漏和近源快速补给有关,第二阶上升段除了受区域性补给影响外,10月后由于天气变冷,用水量减少,地下水位处与区域补给叠加而成;汇流区的上董寨和跃进煤矿孔均体现出2个变幅较大的峰谷值,其中第一峰值为1-2月,第二峰值为2-11月(图5),这种特征也是局部快速补给、区域补给以及开采等因素共同作用的结果。

4 岩溶地下水水位演化趋势

(1) 降水量变化影响。降水量大致在20世纪50-60年代处于丰水阶段,70年代与2010年处于平水阶段,而20世纪80、90年代,2000年处于相对贫水阶段。对比1951-1979年和1980-2015年前后两个时段的降水量变化,后者比前者减少9.80%。20世纪60年代为丰水期阶段,60年代到70、80、90年代持续减少,特别是70年代比60年代减少了12.60%。2010-2015年处于平水阶段,降水量变化幅度相对较

小,对岩溶地下水水位变化影响不大。

(2) 蒸发量的变化。以阳泉气象站的气温为例,前后两个系列的平均气温分别为10.82℃和11.28℃。采用1956-2000年泉域平均降水量504.08mm,根据陶凯经验公式计算,后期的陆面蒸发量比前期增加了5.14mm。如假定陆面蒸发量的增加主要是减少了降水对地下水的入渗补给量,则娘子关泉域的裸露区和覆盖区,由于气温升高而减少的补给量为 $0.436 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(3) 河流来水量变化影响。娘子关泉域内1958-1979年和1980-2000年两期的河流平均渗漏量分别是 $2.45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.61 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,两项相差 $0.84 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(4) 人工开采量变化影响。根据阳泉市水资办和山西省泉域管理处的统计资料,2001-2005年年均开采量为 $1.65 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$,2006-2014年年均开采量为 $0.84 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(5) 其他因素影响。外围潜流补给量减少,建设用地,特别是交通、住宅、厂矿的用地,使得部分岩溶

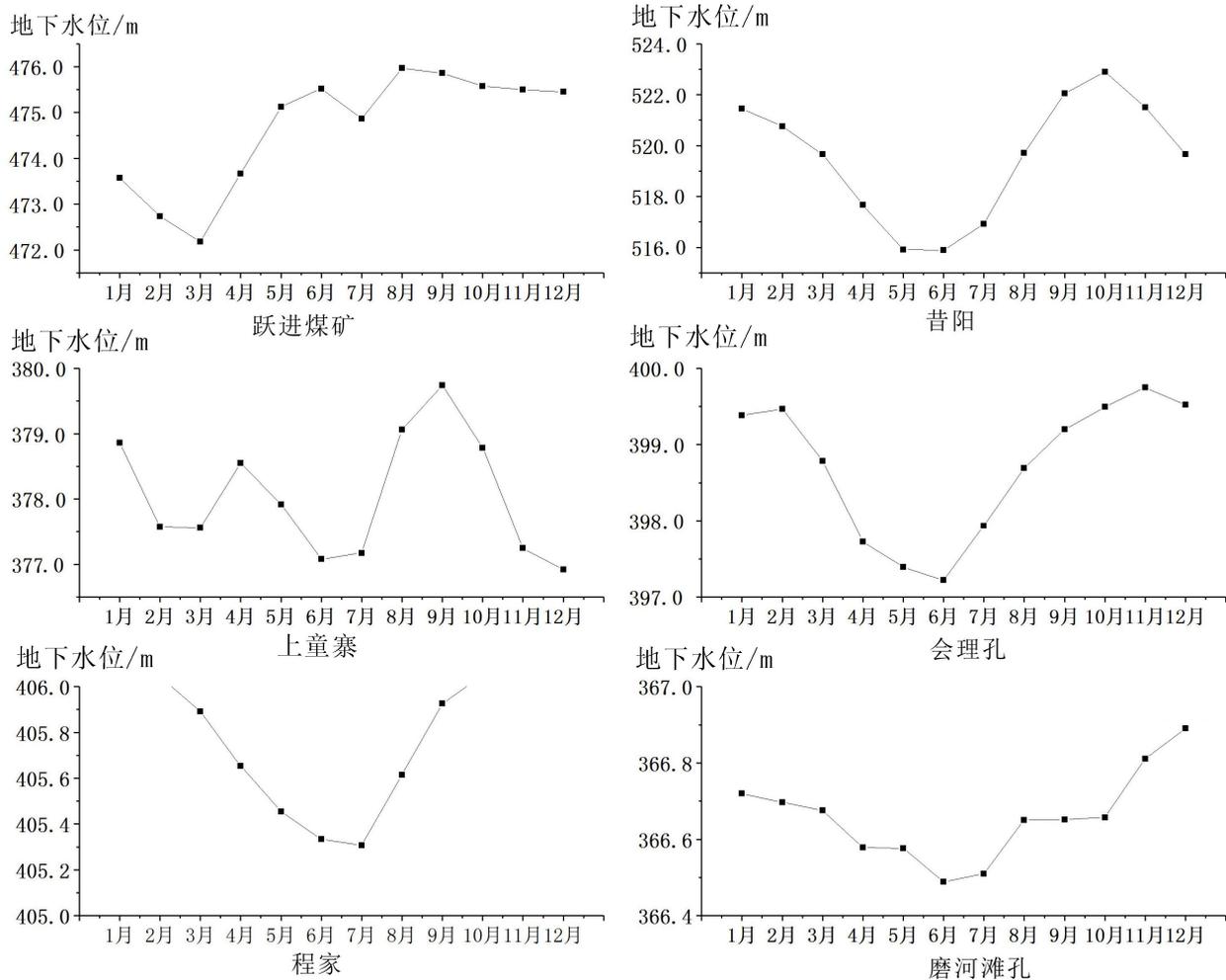


图 5 娘子关岩溶地下水位月动态曲线图

Fig. 5 Monthly variation curve of karst groundwater level in Niangziguan karst area

地下水入渗补给变为零入渗,从而导致了降水入渗补给量减少;煤矿开采改变了地表水的产流条件和碎屑岩区地下水的循环条件,同时也改变了河水对岩溶地下水的渗漏补给条件。在几十年的煤矿开采过程中,一直有含大量粉煤灰的矿坑水直接进入河道,这些细粒煤灰在径流过程中逐渐沉淀,经过多年的积累,目前在河床底部已形成了 10~20 cm 厚的淤积层,构成了防渗盖层,使得河床渗透性变差,从而导致河水对地下水的渗漏补给量减少。

5 结 论

(1) 娘子关泉群流量在 2004 年前总体表现为趋势性下降状态,2004 年之后趋于稳定并略有回升;

(2) 娘子关泉域岩溶地下水位动态变化呈现时间、空间区别,在空间上表现为地下水补给区比径流、排泄区变化大,在时间上分为两个阶段:1980-

2004 年与 2005-2014 年,1980-2004 年长观点总计年均降幅为 2.58 m,2005-2014 年年均降幅为 -0.09 m。

(3) 影响娘子关泉域岩溶地下水位变动的主要因素有降水量、蒸发量、河流来水量的变化,人工开采量的影响及其他因素,使得外围潜流补给量减少。

参考文献

[1] 张人权,梁杏,靳孟贵,等.水文地质学基础(第六版)[M].北京:地质出版社,2011.

[2] 梁永平,韩行瑞,等.中国北方岩溶地下水环境问题与保护[M].北京:地质出版社,2014.

[3] 梁永平,赵春红,唐春雷,等.北方岩溶区水文地质环境地质调查进展:以北京西山岩溶区为例[J].中国地质调查,2015,2(8):1-8.

[4] 梁永平,高洪波,张江华,等.娘子关泉流量衰减原因的初步定量分析[J].中国岩溶,2005,24(3):227-231.

- [5] 梁永平,石东海,李纯纪,等.岩溶渗漏河段来水量与渗漏量间关系测试研究[J].水文地质工程地质,2011,38(2):19-26.
- [6] 王桃良,赵春红,梁永平.地表水渗漏对娘子关岩溶泉水水质的影响[J].水文,2015,35(5):41-45.
- [7] 梁永平,王维泰,赵春红,等.中国北方岩溶水变化特征及其环境问题[J].中国岩溶,2013,32(1):34-42.
- [8] 邓青军,唐仲华,吴琦,等.荆州市地下水动态特征及影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2014,23(9):1215-1221.
- [9] 韩行瑞,鲁荣安,李庆松,等.岩溶水系统:山西岩溶大泉研究[M].北京:地质出版社,1993.
- [10] 山西省水利厅.山西省岩溶泉域水资源保护[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [11] 王焰新,高旭波.人类活动影响下娘子关岩溶水系统地球化学演化[J].中国岩溶,2009,28(2):103-112.
- [12] 傅晓鸣,郝永红,范永辉,等.极端降水对娘子关泉流量的补给研究[J].中国岩溶,2013,32(2):140-147.
- [13] 郝永红,黄登宇,高红波,等.娘子关泉水流量的GM(1,2)时滞预测模型[J].中国岩溶,2004,23(1):44-48.
- [14] 周仰效.山西娘子关泉流量的滑动平均模拟[J].中国岩溶,1986,5(2):29-36.
- [15] 韩行瑞,梁永平.北方岩溶地区水资源科学调配:以娘子关泉域为例[J].中国岩溶,1989,8(2):127-142.
- [16] 刘再华.娘子关泉群水的来源再研究[J].中国岩溶,1989,8(3):200-207.
- [17] 梁永平,赵春红,唐春雷,等.山西娘子关泉水及污染成因再分析[J].中国岩溶,2017,36(5):633-640.

Characteristics and causes of variation of karst groundwater level in the Niangziguan spring area

TANG Chunlei^{1,2,3}, JIN Hua¹, LIANG Yongping^{2,3}, ZHAO Chunhong^{2,3}, SHEN Haoyong^{2,3}, PAN Yaoyun⁴, JING Ze⁵

(1.Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. International Research Center on Karst under the Auspices of United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Guilin, Guangxi 541004, China; 4. The second Geological Engineering Survey Institute of Shanxi Province, Houma, Shanxi 043000, China; 5. Institute of Geological Survey of Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract The Niangziguan spring is one of the largest karst springs in north China. Its clusters are exposed in the Niangziguan town, Pingding county, Yangquan City, Shanxi, with an average annual discharge of $9.81\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ and catchment area about $7,435.8\text{ km}^2$. This spring is the most important water supply source of Yangquan City, which plays an irreplaceable support in urban life and industrial and agricultural production and construction. Under the background of climate change and the increasing intensity of human activities, it is facing some challenging problems, such as the decline of spring flow, water pollution and the continuous decline of karst groundwater level. To further address this issue, based on variation monitoring data of many years, combined with the conditions of groundwater recharge, runoff and drainage, this paper analyzes the characteristics and causes of dynamic changes of karst groundwater in this area. The results show that, (1) overall the water flow declined from 1980 to 2004, then tended to be stable and slightly recovered after 2004; (2) The spatial variation of the groundwater recharge area is larger than that of the runoff area. The variation in time is divided into two stages: 1980–2004 and 2005–2014. In the first stage, the water level showed a continuous decline trend, while in the second stage it experienced a slow decline with fluctuations and small rise at local places. From January 1998 to January 2004, the karst groundwater level in Longzhuang decreased by 22.9 meters, with an average annual variation of 3.82 m. From May 2005 to May 2014, it increased by 1.5 meters with average annual change -0.17 m .

Key words Niangziguan spring, groundwater level, spatial-temporal variation, variation monitoring, cause of change

(编辑 黄晨晖)