

天桥泉域与黄河河段的补径排关系变化及其 对河川径流的影响

刘晓燕¹, 党素珍², 刘昌明^{3,4}

(1. 黄河水利委员会, 郑州 450003; 2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

4. 北京师范大学, 北京 100875)

摘要: 1973年以来, 黄河中游河口镇至吴堡之间未控区的实测径流量大幅减少, 甚至1/4年份出现负值; 基于1956-1972年的降雨—径流关系, 1973-2014年降雨条件的径流量偏少84%。分析认为, 1973年以后, 黄河该河段干流水库蓄水运行导致天桥泉域与黄河之间的补径排关系发生了变化, 此变化不仅大幅减少了左岸泉水对黄河的补给量, 而且增加了黄河向右岸岩溶含水层的渗漏量, 是河口镇至吴堡之间未控区的实测径流大幅偏少的主要原因。本文通过不同时期的降雨径流关系对比, 以及林草植被、梯田、用水和坝库水面蒸发等其他下垫面因素减水作用分析, 推算出因泉水—河水补给关系变化而产生的黄河径流减少量, 平均每年约6~8亿m³。

关键词: 黄河; 天桥泉域; 岩溶水; 径流; 补给—径流—排泄关系

DOI: 10.11821/dlxb201601005

1 问题的提出

黄河中游河口镇至吴堡区间(以下简称河吴间)的流域面积为47548 km², 区间有40多条支流入黄, 其中设有水文站的支流共计14条(以下简称有控支流)。截止2015年, 该区域干流共建成水库3座, 分别是万家寨水库、龙口水库和天桥水库, 总库容分别为8.96亿m³、1.96亿m³和0.67亿m³, 正式蓄水时间分别为1998年、2009年和1975年。

根据1952-2014年的实测数据, 该区域多年平均降雨量为410 mm, 实测多年平均径流量为22.75亿m³, 其中1952-1972年的实测多年平均径流量为38.3亿m³。将河吴间实测径流量减去有控支流的实测径流量, 可得到1952-2014年“河吴未控区”的实测径流量(图1)。由图1可见, 与1956-1972年相比, 1973年以来, “河吴未控区”实测径流量大幅减少, 平均减幅为82%, 甚至1/4的年份出现负值, 这种现象一直维持至今。以区间用水、梯田和林草植被均较1956-1972年变化很小的1973-1979年为例, 其年均降雨量仅较1956-1972年偏少1.5%, 但“河吴未控区”的实测径流量减少92.6%。“河吴未控区”面积为12800 km², 多年平均径流系数为0.1~0.13, 因此, 1973年后出现的径流量锐减现象显然极不正常。

分析认为, 因该河段干流水库蓄水运用导致天桥泉域与黄河之间的补径排关系变化, 是产生河口镇至吴堡未控区径流大幅偏少的主要原因。

收稿日期: 2015-09-02; 修订日期: 2015-12-12

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAB02B05); 国家自然科学基金项目(41301030) [Foundation: National Key Technology R&D Program, No.2012BAB02B05; National Natural Science Foundation of China, No.41301030]

作者简介: 刘晓燕(1964-), 女, 河南永城人, 博士, 教授级高级工程师, 近年主要从事黄河水沙情势研究。

E-mail: liuxiaoyan@yrcc.gov.cn

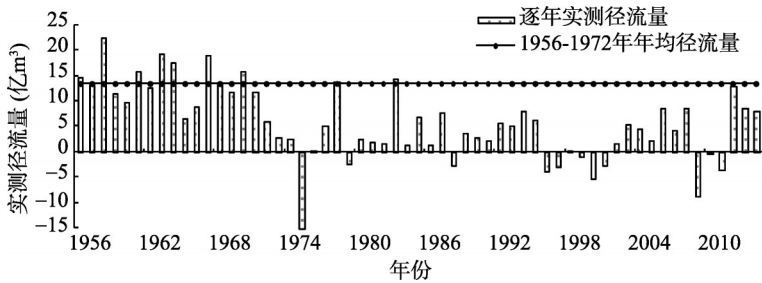


图1 1956-2014年黄河河口镇至吴堡“未控区”实测径流量变化

Fig. 1 Variation of the observed runoff of uncontrolled section from Hekouzhen to Wubao of the Yellow River from 1956 to 2014

2 天然时期天桥泉域与黄河之间的补径排关系

据相关单位勘查^[1-4], 鄂尔多斯盆地是一个大型向斜式沉积盆地, 盆地基底为寒武系—奥陶系碳酸盐岩、该地层以2°~8°倾角从东部插入鄂尔多斯盆地(图2)。该碳酸盐岩地层主要在盆地的东部和南部出露, 盆地西缘因逆冲断裂翘起而局部出露, 盆地北部则因断裂下陷而埋深; 碳酸盐岩地层在盆地中央埋深达4000 m以上, 总厚度2000 m以上, 所赋存的岩溶水处于缓慢径流或滞流状态。

天桥泉域是鄂尔多斯盆地周边岩溶地下水系统的东北部子系统, 位于黄河河口镇至吴堡区间(图3)。据山西省水利部门调查^[5-6], 河吴间左岸支流的上中游地区是天桥泉域的径流补给区, 其中涉及的有控支流包括浑河南部、偏关河、县川河、朱家川、岚漪河和蔚汾河, 降雨入渗和河道渗漏是其径流的主要补给形式。由于该处碳酸盐岩地层含有可溶性强的石膏^[3-4], 加之上覆煤系地层酸性水越流补给^[3, 5], 强化了岩溶发育, 形成了天桥泉域的强径流带, 强径流带可一直延伸至黄河西岸6~10 km。

黄河从喇嘛湾流入天桥泉域, 至府谷县林泉峪流出, 流经河长190 km, 切割了天桥泉域的奥陶系或寒武系碳酸盐岩含水层。因此, 在天然情况下, 天桥泉域的岩溶水大部分在黄河水下溢出(图4)。泉水在黄河河谷的明显出露主要有3处^[5], 分别是天桥水库坝址上首的天桥泉, 龙口水库坝址上首的龙口泉和万家寨水库坝址上首的老牛湾泉。

天桥泉域碳酸盐岩地层总厚度770~885 m^[6]、总体上从东向西倾斜, 加之泉域北缘和南缘的隔水层阻滞, 使岩溶水含水层的径流大体上自东向西输移, 直至黄河西岸的地下水缓流或滞流性阻水边界^[8-9](图2)。岩溶地下水水头在东部径流补给区为1400~1450 m,

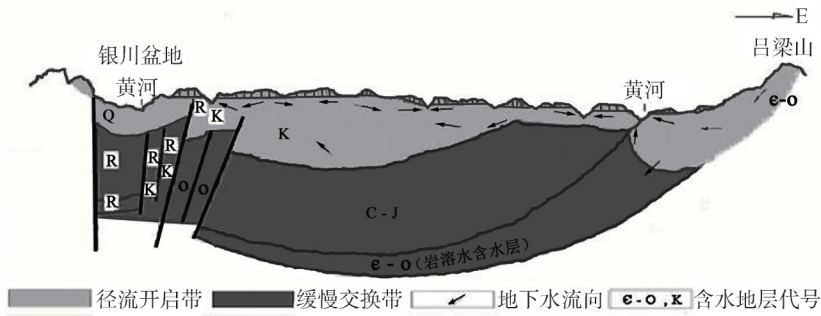


图2 鄂尔多斯盆地东西向水文地质结构剖面示意图

Fig. 2 Schematic map of the EW-trending hydro-geologic profile of the Ordos Basin^[1]

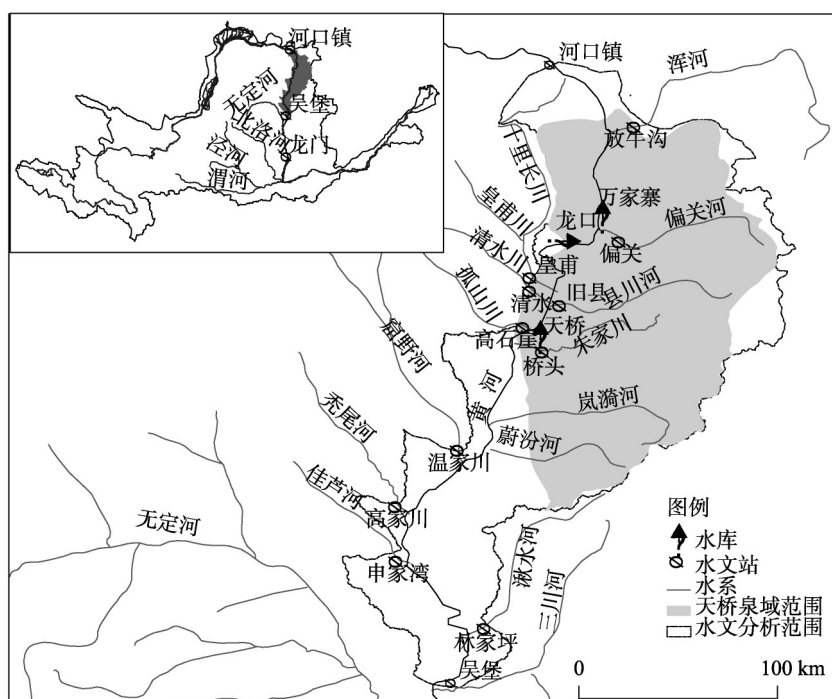


图3 天桥泉域范围及其河口镇至吴堡区间水系简图

Fig. 3 Tianqiao spring region and water system map of Hekouzhen-Wubao section

在黄河河谷处为820~950 m^[5]。

据相关文献推算^[5-6], 天桥泉域地下水流量为20.305 m³/s、折合6.4亿m³/年。而据该区径流系数和降雨量推算, 1972年以前天桥泉对黄河的年均径流补给量约7亿m³。

3 水库蓄水对岩溶水补排关系的影响

由以上分析可见, 在天然情况下, 黄河严格控制了该泉域的排泄, 是天桥泉域岩溶水的主要排泄地。黄河与天桥泉域岩溶水之间的补排关系很大程度上取决于二者的水位差; 当排泄点上覆压力发生变化后, 黄河也可以成为泉域的重要补给源。天桥水库、万家寨水库和龙口水库的蓄水运用均使黄河水位大幅度抬高(表1), 因此必然改变天桥泉域与黄河之间的补径排关系。

天桥水库坝基基本坐落在奥陶系灰岩地层上, 厚140~165 m^[10]。天桥水库蓄水前, 坝前黄河水位和岩溶地下水水位分别为812 m和824 m, 故岩溶水补给黄河(图5a)。天桥水库建成后, 不仅淹没了天桥泉的排泄带, 而且水库水位比自然河道的正常水位抬高了约20 m, 从而使而岩溶水溢出区的上覆压力增大, 导致天桥泉对黄河的补给量减少, 甚至出现黄河补给岩溶水含水层的现象(图5b)。这个转变从河口镇至吴堡“未控区”逐年实测径流量变化(图1)可明显看出: 天桥水库1975年二次截流并试蓄水, 万家寨水

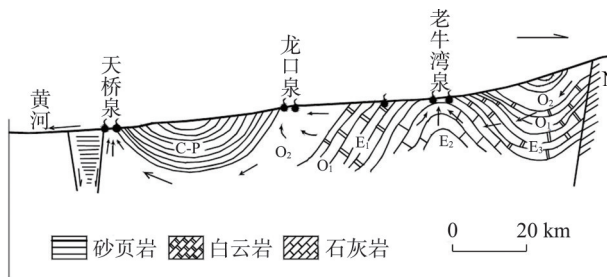


图4 天桥泉域南北向水文地质剖面图^[7]

Fig. 4 NS-trending hydro-geologic profile of Tianqiao spring region^[7]

表1 黄河河吴间干流水库概况

Tab. 1 Overview of reservoirs located at the section from Hekouzhen to Wubao on the Yellow River					
水库名称	截流时间	蓄水时间	坝前岩溶水位(m)	坝前河底高程(m)	正常蓄水位(m)
天桥	1973年	1975年	824左右	812	834
万家寨	1995年12月	1998年	900左右	896	977
龙口	2007年	2008年	863左右	860	898

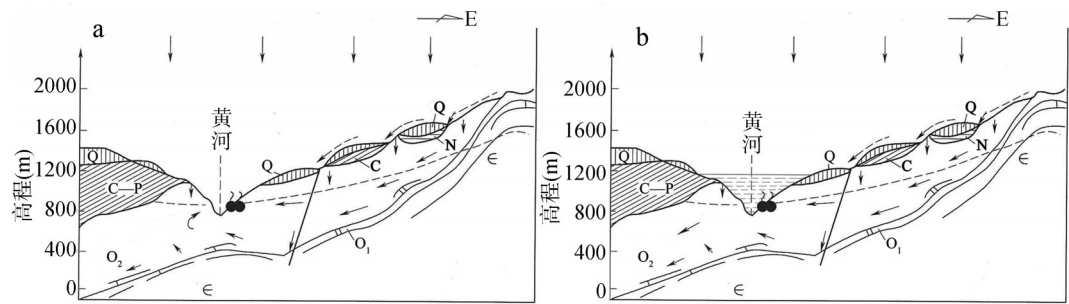


图5 水库蓄水前后天桥泉与黄河的补排关系变化(a. 建库前, b. 建库后)
Fig. 5 Changes of the relationship between recharge, runoff and drainage of Tianqiao spring and the Yellow River before and after the reservoir impoundment (a and b refer to before and after the reservoir construction, respectively)

库1998年蓄水,龙口水库2009年蓄水,在这些水库截流后的蓄水运用初期,“未控区”径流均出现负值,其中1975年和2009年的负值数量(14.9亿m³和8.6亿m³)远大于天桥水库和龙口水库的总库容。

从不同时期天桥泉域的降雨—径流关系,可以更清晰地看出天桥泉域入黄排泄量的变化。考虑天桥泉域的补给区和排泄区范围、河吴间水文站分布,选择“河口镇至吴堡区间”扣除右岸“皇甫川+清水川+孤山川+窟野河+秃尾河+佳芦河”和左岸“湫水河和浑河档阳桥以上”作为天桥泉域的降雨—径流关系分析范围(图3)。对比该区域在天桥水库蓄水前(1956-1972年)和蓄水后(1973-1982年)的降雨—径流关系可见(图6),尽管1973-1982年社会经济用水仅约6000万m³,梯田和林草植被等可能增加耗水的下垫面要素变化很小,但相同降雨情况下的实测径流量大幅偏小,其中1975年实测径流量甚至为“-13.5亿m³”。

基于1956-1972年的降雨—径流关系(图6),将1973年以来各年降雨量代入计算,并使之与同年实测径流量相比,即可得到相应降雨条件下的各年实测径流偏少值(图7)。由图7可见,1973年以来,该区径流的实际偏少程度一直居高不下;在干流上只有天桥水库的1973-1995年,实测径流平均偏少13.8亿m³,其中1975年径流偏少32.1亿m³。

万家寨水库坝基坐落在寒武系中统张夏组^[9],该岩溶水含水层厚度为37~38 m。天然情况下,黄河在万家

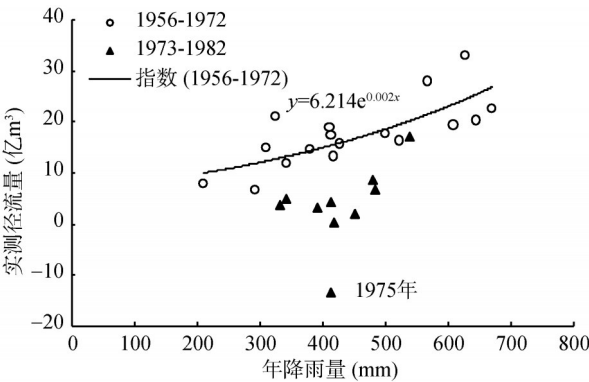


图6 1956-1982年研究区天桥水库蓄水前后的降雨—径流关系变化
Fig. 6 Change of rainfall-runoff relationship before and after Tqianqiao reservoir impoundment in the study area from 1956 to 1982

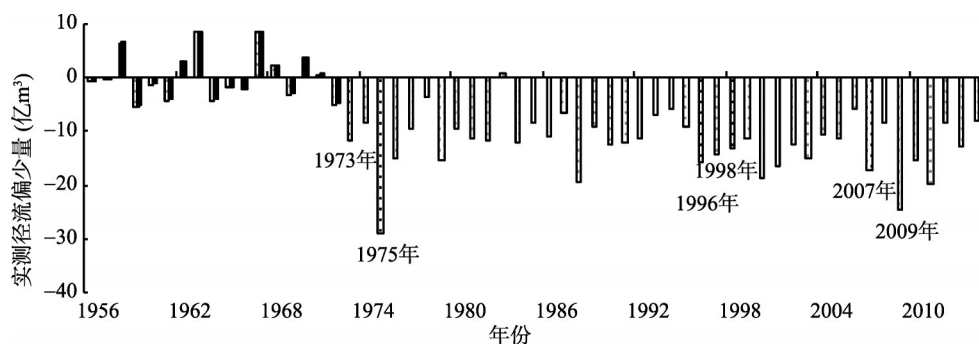


图7 研究区不同时期径流量较1956-1972年的偏少量

Fig. 7 Runoff decrement compared with the average runoff in the study area from 1956 to 1972

寨河段的左岸接受岩溶水补给,右岸因地下水位低而接受黄河水的补给^[11];渗漏的水流充填右岸的地下岩溶空间,并受西部隔水层阻隔、在十里长川与黄河之间形成一条自北向南的渗流带,最终在龙口和天桥一带以泉群形式排泄。万家寨水库蓄水后,黄河水位最大升高80 m、平均升高40 m,因此不仅左岸岩溶水对黄河的径流补给减少,而且使渗入右岸碳酸盐岩地层的河水增多。徐维国认为^[12]万家寨水库蓄水运用后即发生渗漏,且渗漏量随蓄水位升高而增大,库水位970 m和980 m时渗漏量分别达13.6 m³/s和15.8 m³/s。张玉贞等分析认为^[13]万家寨水库蓄水后,准格尔矿区的岩溶地下水位升高了0.66~31.07 m,岩溶水储存量增加了8066万m³。

龙口水库位于万家寨水库和天桥水库之间,坝址区地层岩性主要为寒武系—奥陶系灰岩,该地层总厚770~885 m。大坝坐落在奥陶系O₂¹³和O₂¹²和O₂¹¹上^[9],其中O₂¹³和O₂¹¹岩性坚硬、裂隙发育,是承压含水层。与万家寨水库一样,在建库前的天然时期,该河段左岸接受岩溶水补给、右岸黄河水补给岩溶水含水层。水库蓄水运用后,河水水位最大抬高38 m,平均抬高19 m,因此出现黄河反补岩溶水含水层的现象。程开明等^[14]计算认为龙口水库蓄水运用后,库区最大渗漏量为5.7 m³/s;龙口水库渗漏水一部分增加两岸地层的岩溶水储存量,另一部分在天桥水库与龙口水库之间重返黄河。

综上,由于干流筑坝蓄水,大幅抬高了黄河水位,从而减少了岩溶水对黄河的补给,增加了河水向岩溶地下水的渗漏补给,结果必然导致泉域下游的黄河干流段径流减少。由此减少的黄河径流量与干流水库蓄水位密切相关。1977-1997年是天桥水库单独运用时期,也是区域下垫面变化较小的时期。采集该时期天桥水库逐年的汛初/汛末平均蓄水位(注:1983-1993年中有7年缺测),并与研究区同期径流偏少量进行对比(图8)。由图8可见,无论是水库运用初期(1977-1979年),还是水库运用后期(1980-1997年),水库运用水位均与研究区实测径流偏少量明显相关,水库运用水位越高、径流偏少量越大。张玉贞等^[13]也发现,万家寨水库蓄水后,准格尔矿区的岩溶地下水位与

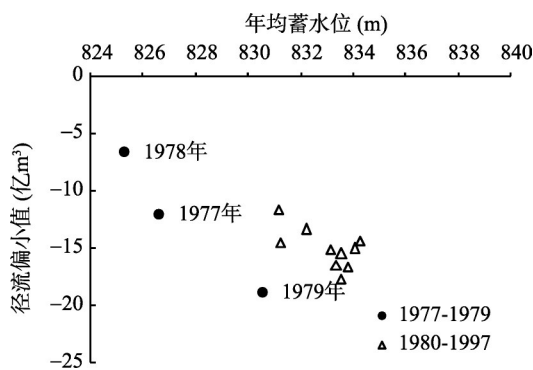


图8 1977-1997年天桥水库年均蓄水位与研究区径流偏少量之间的关系

Fig. 8 The relationship between annual average storage level of Tianqiao reservoir and runoff decrement in the study area from 1977 to 1997

水库水位同步升降。

理论上, 如果本区岩溶水溢出量减少, 必然使其他区径流增加, 但仍未找到实测数据的支撑。为尽可能减少人类用水增加和下垫面变化的影响, 仍选择 1956-1972 年和 1973-1982 年作为对比分析时段, 比较了与以上地区相邻、同属鄂尔多斯盆地岩溶水系统的吴堡至龙门区间以及北洛河流域的年降雨—径流关系变化 (图 9)。由图 9 可见, 天桥水库运用前和运用后, 两区的年降雨—径流关系变化极小, 说明河口镇至吴堡区间“走失”的岩溶水并未出现在这两个地区。比较研究区内左岸支流的降雨—径流关系变化 (图 10), 发现其相同降雨情况下, 1973-1982 年径流量不仅没增加, 而且有所减少。

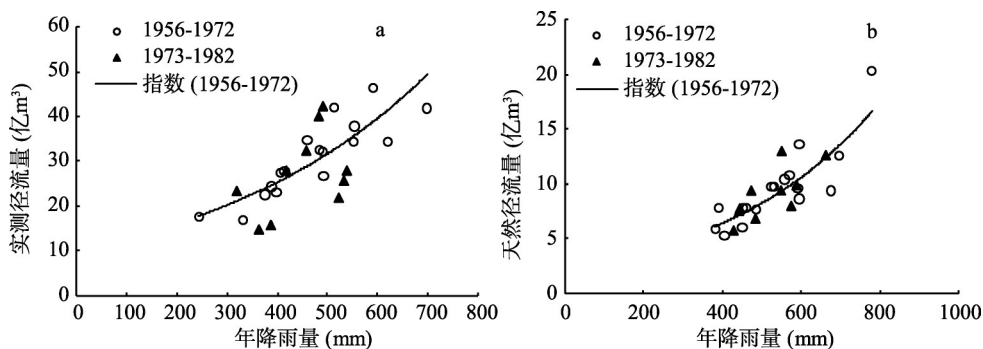


图 9 1956-1982 年相关地区降雨—径流关系变化(a. 吴堡至龙门区间, b. 北洛河)

Fig. 9 Changes of rainfall-runoff relationship in related area (a is the section from Wubao to Longmen, b is Beiluo River)

分析可见 (图 2、图 4), 天桥泉域南北两端均为页岩隔水边界^[4-7], 西部奥陶系碳酸盐岩顶板埋深 800~1000 m、是岩溶地下水的缓流或滞流阻水边界。不过, 岩溶地区的溶隙连通性和充水程度通常差异很大, 有些地方的溶隙或溶洞甚至没有径流的出口, 而且碳酸盐岩的溶隙或溶腔是能够不断发育的特殊结构^[15]。因此, 未能正常泄入黄河的岩溶水可能进入鄂尔多斯盆地碳酸盐岩地层的深处, 而最近的岩溶水西部出露点距离天桥水库约 400 km^[1-4] (图 2), 因此短期内很难看到“走失水”的再现。当然, 以上推测仍需未来地质调查数据的支持。

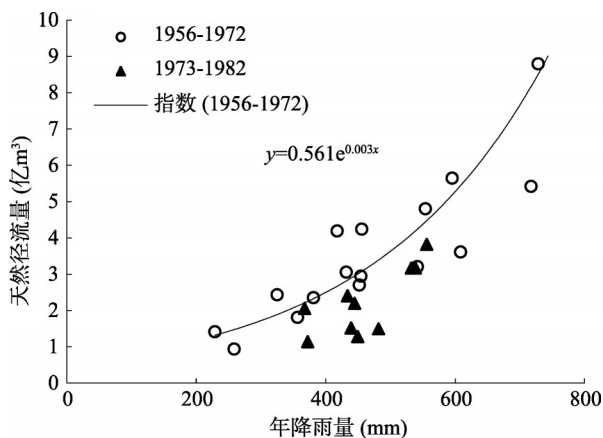


图 10 1956-1982 年研究区天桥泉域区有控支流的降雨—径流关系变化

Fig. 10 Changes of rainfall-runoff relationship in the monitored-tributary area of the Tianqiao spring region from 1956 to 1982

4 补排关系变化对黄河径流的影响

要定量评价水库蓄水对天桥泉补给黄河水量的影响, 需在充分了解该区水文地质构造的基础上, 对水库蓄水前后的岩溶水补给量进行长时段跟踪监测。然而, 由于该区三座水库已经建成, 这样的技术路线现在已很难实现。因此, 只能通过不同时期的降雨—径流关系对比和水量综合平衡分析, 计算水库蓄水对黄河径流的影响量。

基于1956-1972年的降水—径流点据（图6），可以拟合出两个相关系数非常接近的函数关系式。将1973-1975年、1976-1997年、1998-2006年、2007-2014年的年均降雨量分别代入计算，可得到“水文分析范围”在相应时期实测径流量的可能偏少范围，分别为16.14~16.59亿m³、10.21~10.68亿m³、12.41~12.90亿m³和14.11~14.45亿m³（表2）。

表2 1973-2014年天桥泉域各类耗水量计算结果(亿m³)
Tab. 2 Water consumption in the Tianqiao spring region from 1973 to 2014 (10⁸m³)

时段	1973-1975年	1976-1997年	1998-2008年	2007-2014年
实测径流偏少量①	16.14~16.59	10.21~10.68	12.41~12.90	14.11~14.45
已知的径流消耗量②				
社会经济耗水增量	0.72	1.98	2.31	3.44
梯田减水量	0.08	0.29	0.64	0.81
林草减水量	-0.12	-0.05	1.78	3.31
坝库蒸发增量	0.07	0.08	0.28	0.36
小计	0.75	2.30	5.01	7.92
不平衡水量(①-②)	15.39~15.84	7.91~8.38	7.40~7.90	6.19~6.53

显然，人类用水和水利水保耗水等都是造成该河段径流偏少的可能因素^[16-17]。为此，基于文献[18]给出的不同时期林草植被覆盖率和梯田面积数据，以及文献[19]提出的林草植被变化与河川径流的定量响应关系，计算了4个时期的林草植被变化减水量、以及梯田减水量；统计了同期社会经济耗水量及其较“1956-1972年”的耗水增量；利用文献[20]获取了研究区坝库的水面蒸发损失。将以上结果与同期实测径流偏少量对比可见，即使扣除同期社会经济耗水增量、梯田和林草减水量、坝库蒸损增量，4个时期仍分别有15.39~15.84亿m³、7.91~8.23亿m³、7.40~7.9亿m³、6.19~6.53亿m³的不平衡水量，其中1976-2014年平均约7.6亿m³。

作者认为，该不平衡水量应主要为干流水库蓄水导致“黄河与天桥泉域之间的径流补排关系变化”所带来的河川径流影响量。也就是说，由于水库蓄水运用增大了天桥泉域溢出区的上覆压力，不仅损失了本可补给黄河的“6.4~7亿m³”，而且形成了黄河反补岩溶水含水层的情况。

理论上，随着两岸溶腔或溶隙被渗漏水充满，因水库蓄水导致的黄河对岩溶水含水层的补给量可能会有所减小，对河川径流的影响量将有所降低，如龙口水库蓄水以来的2007-2014年不平衡水量已明显小于天桥水库单独运用时期的7.91亿m³。然而，该河段黄河两岸恰是石炭二叠系煤田所在地，近年逐渐进入大规模开采期；煤层下距寒武系—奥陶系地层的承压含水层一般只有十几至几十米，因此采煤形成的采空区或老窑可能会在岩溶水头作用下出现透水。因此，从长期发展看，6~8亿m³可视其为因干流水库蓄水运用导致泉水—河水补给关系变化而产生的黄河径流减少量。

5 结论

（1）与1956-1972年相比，1973-2014年河口镇至吴堡之间未控区的年实测径流减少82%，甚至时而出现负值；若基于1956-1972年的降雨—径流关系，1973-2014年降雨条件的径流量偏少84%。分析认为，干流水库蓄水运用导致天桥泉域与黄河之间的补径排关系变化，是该区年径流大幅偏少的主要原因。

（2）天然情况下，天桥泉域在黄河左岸的支流上游接受降雨和河流入渗补给，在黄

河喇嘛湾至天桥一带的河谷溢出。干流水库蓄水后, 改变了黄河水位与岩溶水水位的对比态势, 结果不仅大幅减少了左岸泉水对黄河的补给量, 而且增加了黄河对右岸岩溶含水层的补水量; 水库运用水位越高, 黄河实测径流的偏少量越大。

(3) 通过对比天然时期和1973年以来的降雨—径流关系, 核实社经耗水增量、林草和梯田减水量、蓄水工程蒸发等下垫面因素耗水量, 认为因泉水—河水补给关系变化而产生的黄河年径流减少量约7~8亿 m^3/a 。目前, 仍不能确定该“走失”径流的最终归宿。

黄河是中国北方和西北地区的主要供水水源, 供需形势一直非常紧张; 更为严峻的是, 2007-2014年, 在降雨偏丰5%的情况下, 黄河花园口天然径流量由天然时期的560亿 m^3 减少至490亿 m^3 , 摸清黄河年径流大幅减少的原因已成为当务之急。本文提出的分析结论, 对准确把握黄河近年径流大幅减少的原因具有重要意义。

参考文献(References)

- [1] Wang Deqian, Liu Zuzhi, Yin Lihe. Hydro-geological characteristics and groundwater systems of the Erdos Basin. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(1): 6-13. [王德潜, 刘祖植, 尹立河. 鄂尔多斯盆地水文地质特征及地下水系统分析. 第四纪研究, 2005, 25(1): 6-13.]
- [2] Hou Guangcai, Zhang Maosheng, Wang Yonghe, et al. Groundwater resources of the Ordos Basin and its development and utilization. *Northwestern Geology*, 2007, 40(1): 7-32. [侯光才, 张茂省, 王永和, 等. 鄂尔多斯盆地地下水资源与开发利用. 西北地质, 2007, 40(1): 7-32.]
- [3] Liang Yongping, Han Xingrui, Shi Jian, et al. The karst groundwater system in the peripheral area of Ordos Basin: Its patterns and characteristics. *Acta Geoscientica Sinica*, 2005, 26(4): 365-369. [梁永平, 韩行瑞, 时坚, 等. 鄂尔多斯盆地周边岩溶地下水系统模式及特点. 地球学报, 2005, 26(4): 365-369.]
- [4] Yan Fugui, Liang Yongping, Zhang Yilong, et al. Discussion about development mode of karst and exploitation of karst water around the Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(6): 227-234. [闫福贵, 梁永平, 张翼龙, 等. 鄂尔多斯盆地周边地区岩溶发育模式及岩溶地下水开发利用探讨. 地学前缘, 2010, 17(6): 227-234.]
- [5] Water Resources Department of Shanxi Province. *Karst Water Resources Conservation in Shanxi Province*. Beijing: China WaterPower Press, 2008. [山西省水利厅. 山西省岩溶泉域水资源保护. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.]
- [6] Niu Wei. Assessment on karst spring water resources of Tianqiao spring-fed area. *Shanxi Hydrotechnics*, 2007, 164(2): 58-60. [牛威. 天桥泉域岩溶水水资源评价. 山西水利科技, 2007, 164(2): 58-60.]
- [7] Lin Xueyu, Wang Jinsheng. *Groundwater Resources and Its Renewal Capability Research in Yellow River Catchment*. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2006. [林学钰, 王金生. 黄河流域地下水资源及其可更新能力研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.]
- [8] Lin Liangjun, Wang Jinsheng, Lin Xueyu. Characteristics of karst groundwater flow in the northern part of Shanxi-Shaanxi gorge area. *Acta Geoscientica Sinica*, 2004, 25(6): 665-669. [林良俊, 王金生, 林学钰. 晋陕峡谷地区北段岩溶地下水水流特征分析. 地球学报, 2004, 25(6): 665-669.]
- [9] Xu Hao, Tang Dazhen, Tang Shuheng, et al. Geologic and hydrological controls on coal reservoir water production in marine coal-bearing strata: A case study of the Carboniferous Taiyuan Formation in the Liulin area, eastern Ordos Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 59: 517-526.
- [10] Yellow River Engineer Consulting Institute. *Chronicles of the Yellow River Hydro-engineering Project*. Zhengzhou: Henan People's Publishing House, 1996. [黄河勘测规划设计研究院. 黄河水利水电工程志. 郑州: 河南人民出版社, 1996.]
- [11] Zheng Yuejun, Cui Yali, Shao Jingli, et al. Recharge of the Wanjiashai reservoir to karst groundwater. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2005(5): 24-26. [郑跃军, 崔亚莉, 邵景力, 等. 万家寨水库对库区岩溶地下水的补给作用. 水文地质工程地质, 2005(5): 24-26.]
- [12] Xu Weiguo. Analyze karst seepage on the right bank of the Wanjiashai reservoir area. *China Water Resources*, 2002(11): 73-74. [徐维国. 万家寨水利枢纽库区右岸岩溶渗漏分析. 中国水利, 2002(11): 73-74.]
- [13] Zhang Yuzhen, Sun Zhanqi, Yuan Shixin. The impounding impact of Wanjiashai reservoir to karstic groundwater in Jungar mining area. *Coal Geology of China*, 2007, 19(Suppl. 2): 18-19. [张玉贞, 孙占起, 袁仕新. 万家寨水库蓄水后对准格尔矿区岩溶地下水的影响. 中国煤田地质, 2007, 19(增2): 18-19.]
- [14] Cheng Kaiming, Ren Hongjun. A study of the seepage of Longkou water conservation reservoir. *Journal of Electric*

- Power, 2007, 22(4): 523-528. [程开明, 任红俊. 龙口水利枢纽库区渗漏浅析. 电力学报, 2007, 22(4): 523-528.]
- [15] Shu Longcang, Tao Yuezan. Groundwater Hydrology. Beijing: China WaterPower Press, 2009. [束龙仓, 陶月赞. 地下水文学. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.]
- [16] Yue Xiaoli, Mu Xingmin, Zhao Guangju, et al. Dynamic changes of sediment load in the middle reaches of the Yellow River basin, China and implications for eco-restoration. Ecological Engineering, 2014, 73: 4-72.
- [17] Gao P, Mu X-M, Wang F, et al. Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(1): 1-10.
- [18] Liu Xiaoyan, Wang Fugui, Yang Shengtian, et al. Sediment reduction effect of level terrace in the hilly-gully region in the Loess Plateau. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 793-800. [刘晓燕, 王富贵, 杨胜天, 等. 黄土丘陵沟壑区水平梯田的减沙作用研究. 水利学报, 2014, 45(7): 793-800.]
- [19] Liu Xiaoyan, Liu Changming, Yang Shengtian, et al. Influences of shrubs-herbs-arbor vegetation coverage on the runoff based on the remote sensing data in Loess Plateau. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(11): 1595-1603. [刘晓燕, 刘昌明, 杨胜天, 等. 基于遥感的黄土高原林草植被变化对河川径流的影响分析. 地理学报, 2014, 69(11): 1595-1603.]
- [20] Zhang Li, Sun Jianqi, Tian Yong, et al. Evaporation loss of the water storage projects in the region above Huayuankou of the Yellow River. Yellow River, 2014, 36(7): 95-96, 99. [张丽, 孙建奇, 田勇, 等. 黄河花园口以上蓄水工程新增蒸发损失分析. 人民黄河, 2014, 36(7): 95-96, 99.]

Change of the relationship between recharge, runoff and drainage of groundwater in Tianqiao spring region and Yellow River reach and its impact on runoff

LIU Xiaoyan¹, DANG Suzhen², LIU Changming^{3,4}

(1. Yellow River Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China;
2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, CAS, Beijing 100101, China; 4. Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Since 1973, the observed runoff of the uncontrolled areas of the section between Hekouzhen and Wubao of the Yellow River has remarkably decreased, or even, it had been dried up for a quarter of the years; based on the rainfall-runoff relationship between 1956 to 1972, the observed runoff decreased by 84% under the rainfall condition from 1973 to 2014. In this paper, the analysis results showed that the relationship between recharge, runoff and drainage of groundwater and in the Tianqiao spring region of the Yellow River has changed because of reservoir operation along the main stream of this section. This not only significantly reduced the spring recharge into the Yellow River on the left bank, but also increased the amount of leakage to the karst aquifer on the right bank. It is the main reason for the remarkable observed runoff reduction of the uncontrolled areas of section between Hekouzhen and Wubao of the Yellow River. In comparison of rainfall-runoff relationships in different periods, and analysis of water reducing effect of other underlying factors, such as vegetation, terraces and surface water evaporation of dams, the calculation results showed that changes of the recharge relationship between spring water and runoff resulted in runoff reduction of about 600-800 million m³ per year on average in the Yellow River.

Keywords: Yellow River; Tianqiao spring region; karst groundwater; runoff; the relationship between recharge, runoff and drainage