

# 增加河流生态基流的山间河谷型调蓄模式研究

张 薇, 王文科, 段 磊, 张 倩

(长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 利用山间河谷阶地调蓄洪水, 将“灾害水”转化为“资源水”增加河流生态基流, 维护河流生态健康. 从可调蓄洪水量和调蓄空间两方面进行可行性分析, 并开展原位试验验证山间河谷型调蓄模式的系统构成及调蓄效果. 通过数值模拟计算出洪水在包气带、含水层中的储存量、以及对河流生态基流的贡献量. 结果表明, 原位试验期间调蓄洪水量为 27 815.3 m<sup>3</sup>, 其中 38.8% 的水量滞留在包气带中; 24.9% 的水量储存在含水层中; 36.3% 的水量排泄补给给河水, 增加河流生态基流. 运行 MODPATH 模块后发现洪水滞留 180 d 后开始补给河水, 增加河流生态基流.

**关键词:** 河流生态基流; 引洪入渗; 山间河谷型调蓄模式; 数值模拟

**中图分类号:** P641

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2014)06-0844-04

渭河流域河川径流受降雨影响大, 径流量时空分布不均, 干旱断流与洪涝灾害同在. 受自然与人类活动影响, 渭河流域河流径流量急剧减少; 受城市污水排放的影响, 流域内河流水质差, 其中“渭河干流宝鸡峡以下河段全部为 V 类或超 V 类”; 由于水土流失侵蚀强度居高不下, 渭河流域干流泥沙含量大, 河道淤积, “渭河下游已成为地上悬河, 目前提防仅能抵御 12 年一遇洪水”<sup>[1]</sup>. 渭河流域集资源短缺、水质污染和泥沙淤积三大问题于一体, 并且这些因素相互作用导致了流域生态环境系统不断恶化. 要解决渭河流域河流的环境生态问题必须在河流的上游地区含蓄水源保障河流的生态基流.

目前对于河流生态基流并未形成统一的定义. 1940 年美国学者研究了鱼类生长和河流流量的关系, 并提出了河流最小环境流量的概念<sup>[2-3]</sup>, 开启了对河流生态基流的研究. 本文涉及的河流生态基流, 是指一定时段内河流维持基本生态功能应保持的基础流量. 河流生态基流量并不是一个固定的数值, 在特定时段内是可以变化的, 是与不同时段河流生态环境相协调的, 强调年内变化过程.

## 1 山间河谷型调蓄模式

山间河谷型调蓄模式就是以地下水与地表水的转化关系为基础, 在地下水补给地表水的区域, 利用含水层的调蓄作用延长洪水的滞留时间, 增加水资源循环的途径, 从而保障河流生态基流, 并且增加可利用水资源量. 山间河谷型调蓄模式适用于地下水补给河水的区域. 以渭河干流为界, 渭河以北的各支流都是地下水排泄补给河水. 经统计在整个渭河流域大约 99% 的流域面积内都是地下水补给河水<sup>[4]</sup>.

山间河谷型调蓄模式是利用山间河谷区河流的一级阶地对洪水进行调蓄. 一般是从上游某一位置通过引水、输水系统等将洪水引到一级阶地的后缘, 采用地表大面积入渗和渠渗、坑、沟、畦等方式促进洪水的入渗. 洪水通过包气带在含水层中滞留一段时间后排泄至河流, 从而增加河流流量, 在枯水期增加河流的生态基流量.

## 2 山间河谷型调蓄模式的必要性和可行性研究

### 2.1 山间河谷型调蓄模式的必要性

渭河北岸各支流均依靠地下水排泄补年给, 地下水对维持河流健康具有重要的作用. 根据贾佳论文中渭河北岸支流年径流量、生态基流和基流量的相关数据, 以渭河北岸支流葫芦河为例 (表 1), 在丰水和平水年里河流径流量可以满足河流生态基流, 生态基流保障程度好. 而在枯水年, 8 月份径流量无法保障河流生态基流. 在特枯年的 3 月、4 月、5 月、8 月份径流量无法保障河流生态基流. 特枯年的非汛期生态基流缺失严重. 而在枯水年和特枯年, 河流径流中平均 53% 和 41% 的流量来自于地下水的补给, 尤其是在径流无法保障河流生态基流的月份, 径流量中仍有 10% 以上由地下水补给. 而在汛期河流径流量远远超过生态基流, 最高可达 11 倍之多. 因此要保障河流非汛期生态基流就必须开展丰水期洪水的地下调蓄工作.

收稿日期: 2013-07-10

修改稿日期: 2014-11-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项“渭河水污染防治专项技术与示范”, 课题名称: 渭河关中段地下水对河流生态基流的保障研究 (2009ZX07212-002-003-003)

作者简介: 张薇 (1982-), 女, 博士研究生, 主要从事干旱地区城市规划与地下水资源开发利用研究. E-mail: zhangwei\_1108@126.com

表 1 葫芦河基流、径流与生态基流的关系统计表  
Tab.1 The relationship between base flow, runoff and the ecological base flow of the Hulu River

月份	枯水年 1972		特枯年 2001	
	径流/生态基流	基流/径流	径流/生态基流	基流/径流
1	11.21	0.84	1.86	0.90
2	7.39	0.84	1.49	0.62
3	12.07	0.51	0.20	0.39
4	7.93	0.65	0.07	0.33
5	6.66	0.39	0.04	0.67
6	11.67	0.12	1.06	0.04
7	2.65	0.39	1.64	0.004
8	0.92	0.12	0.87	0.09
9	1.86	0.70	4.93	0.13
10	2.13	0.77	4.10	0.56
11	2.19	0.77	4.72	0.6
12	3.0	0.32	2.41	0.53

2.2 山间河谷型调蓄模式的可行性

2.2.1 水量保障

根据河流径流量的变化规律, 将每年 7~10 月份定为调蓄期, 以调蓄期内河流生态基流的平均值作为调蓄依据, 当河流径流量大于两倍的生态基流时作为洪水开始调蓄. 通过对渭河北岸支流四个水文站流量资料的统计计算, 得出不同频率年可用于调蓄的洪水量 (表 2). 由于河流径流量的差异, 在保障河流生态基流的前提下, 这四条河流的总调蓄量在特枯年为  $11\times10^8\text{ m}^3$ , 相当于大型水库的库容; 而在平水年更是特枯年洪水量的 5 倍之多. 丰水年可调蓄洪水量为  $92.28\times10^8\text{ m}^3$ , 水量更为丰富.

表 2 不同频率年调蓄洪水量统计表 ( $10^8\text{ m}^3$ )  
Tab.2 The flood volume regulated in different frequency years

	丰水年	平水年	枯水年	特枯年
葫芦河	8.53	2.64	0.23	0.67
马莲河	11.06	8.36	6.18	1.63
泾河	45.06	29.06	17.51	3.87
北洛河	27.63	17.35	9.67	4.83
合计	92.28	57.41	33.59	11.0

2.2.2 调蓄空间保障

用体积法计算可调蓄空间<sup>[5]</sup>:  $V=\mu AM$ , 其中  $V$  为含水层可调蓄空间 ( $\text{m}^3$ ),  $\mu$  为含水层给水度,  $A$  为含水层可调蓄面积 ( $\text{m}^2$ ),  $M$  为含水层可调蓄厚度 ( $\text{m}$ ). 在具体计算中给水度以 0.2 计, 可调蓄厚度取 3 m, 可调蓄面积以河流长度与阶地宽度的乘积计算. 葫芦河、马莲河、泾河和北洛河流程总长度为 1 806.7 km, 按照河流长度的 30%作为调蓄地段长度 (调蓄河流上游的洪水), 阶地宽度取 500 m. 根据上述数据和公式可以计算出渭河北岸四条河流的调蓄空间为  $16.26\times10^8\text{ m}^3$ . 调蓄空间为枯水年可调蓄洪水量的 50%, 为平水年和丰水年可调蓄洪水量的 28.3%和 17.6%, 因此还需要其它调蓄模式作为补充.

3 山间河谷型调蓄模式的适用条件

山间河谷型调蓄模式是针对地下水补给河流的水循环模式而开展的通过人工手段增加水循环路径、提高地下水更新速率的一种模式. 这种模式应用于地下水补给河水地区, 且地下水类型要求为潜水, 潜水含水层以及上部包气带渗透能力较强, 利于洪水的入渗. 要求调蓄区域位于河流岸边的一级或者二级阶地上, 减少人工建设的工作量和引水管道的长度、减少水力损失. 地面坡度应大于 0.4% (城市排水最小坡度), 保证洪水在系统中依靠自重流动, 不需要人工动力. 阶地前缘与河床有 3~10 m 高差且阶地前缘边坡稳定性较好, 洪水回灌入渗场地后与河水具有明显水头差, 加快入渗速率.

4 山间河谷型调蓄模式的调蓄效果

4.1 原位试验概况

为了进一步论证山间河谷型调蓄模式的可行性, 我们开展原位试验的研究. 原位试验场地位于渭河一级支流金陵河河谷区的阶地上, 整个阶地东北部被黄土塬环绕, 西南临河, 西沿高出金陵河河床 2~4 m, 北部、东部与黄土台塬相连, 此次原位试验占地  $3.6\times10^4\text{ m}^2$ . 试验区地下水为松散岩类孔隙潜水, 地下水

位埋深 6.5~8 m, 含水层厚度 4~7 m, 岩性为砂砾石、漂石、亚砂土、砂质粘土, 渗透性能较低. 包气带厚度 3~8 m, 岩性为砂、砂砾、卵石及砂质粘土. 原位试验于 2010 年底开始选点并进行前期的准备工作; 于 2012 年 10 月建成, 入渗系统开始运行, 共进行了 4 次入渗试验.

#### 4.2 原位试验构成

原位试验设施由四部分构成, 分别为: 引水与沉砂设施、贮水与输水设施、入渗设施、地下水位监测设施(图 1). 原位试验选用河水作为回灌水源, 在河中堆砌小型滚水坝降低河流流速, 提高沉砂效果. 通过水泵从河中集水池提取河水注入贮水池, 经过贮水池中的多孔缓冲板后, 水流趋于稳定, 再用自计水位监测计记录通过三角堰的流量. 贮水池的出口与输水管道相连, 再分为两条入渗管道入渗地下. 李云峰<sup>[6]</sup>等人从计算角度将人工补给含水层的方式分为三类: 面状人工补给、线状人工补给和点状人工补给. 本次原位试验采用线状人工补给. 输水管道和入渗管道均采用直径为 400 mm 的高密度聚乙烯管, 用于入渗的管道在管道一次开孔, 并在管道四周填充直径约 10 mm 的砾石滤料, 一方面可以过滤河水中的泥沙, 另一方面可以增加管道周围的入渗量. 这种调蓄模式是利用含水层的调蓄作用, 通过人工措施将洪水储存在含水层中补充枯水期的河道生态基流量. 洪水的回灌必然会引起地下水位的上升, 但是过高的地下水位会影响地表农作物的生长, 更为严重的是会引起土壤的盐渍化. 因此要控制地下水位的上升幅度, 使其在安全范围内波动. 原位试验时在场内布置有 7 个观测井, 用自计水位监测计记录水位波动.

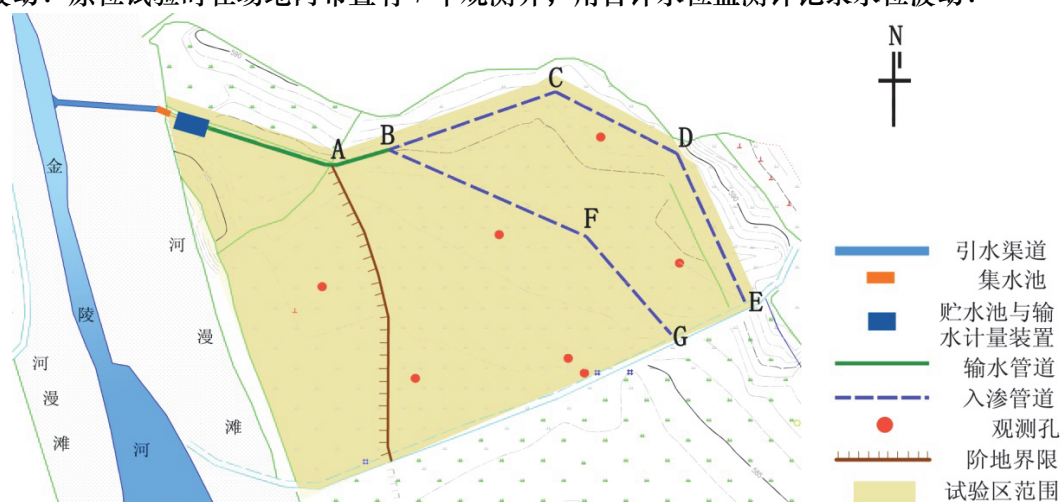


图 1 原位试验设计图

Fig.1 The design of in situ test

#### 4.3 原位试验调蓄效益

试验期间共进行了 4 次入渗试验, 总回灌量为  $27\,815.3\text{ m}^3$ , 其中单管回灌量(仅给 B-E 段的一根入渗管道供水)为  $18\,290\text{ m}^3$ , 全管回灌量为  $9\,525.3\text{ m}^3$ . 为进一步量化反映山间河谷型地下调蓄模式的作用与效益, 在金陵河引洪入渗试验后, 运用 Visual MODFLOW 软件对金陵河河谷区的洪水地下调蓄功能进行数值模拟. 根据试验区的水文地质特征, 将地下水视为非均质、各向同性二维非稳定流, 试验场地分为河漫滩、一级阶地和二级阶地, 根据冲击试验计算结果, 区内含水层渗透系数分别为  $8\text{ m/d}$ 、 $3\text{ m/d}$  和  $3.58\text{ m/d}$ , 给水度  $S_y(\mu)$  为 0.08. 根据模型的模拟结果, 试验期间共调蓄洪水  $27\,815.3\text{ m}^3$ , 在模型验证期末时刻地下水位恢复稳定后, 增加含水层储存量为  $6\,914.52\text{ m}^3$  (占调蓄量的 24.9%); 最终随地下水流排泄到金陵河的水量为  $10\,104.83\text{ m}^3$  (占调蓄量的 36.3%), 增加了金陵河的径流量; 其余  $10\,795.95\text{ m}^3$  的调蓄水量(占总调蓄量的 38.8%)在下渗过程中滞留在包气带. 运行 MODPATH 模块, 模拟洪水在含水层中的储存时间. 结果表明, 洪水在含水层中储存并滞留了 180 d 后进入金陵河.

以上数值模拟的结果表明, 山间河谷型调蓄模式可以有效地滞留短时、集中的洪水, 并在含水层中储存 180 d. 将每年的 7、8、9、10 四个月作为调蓄期, 渗入地下的洪水将在第二年的 1、2、3、4 月开始渗入河流补给河水, 增加枯水期的河流生态基流.

## 5 结论

山间河谷型调蓄模式是一种切实可行的增加河流生态基流的方法, 通过原位试验证明该模式可以有效的调蓄洪水, 使得短时的洪水在含水层中滞留一定时间后在枯水期也就是河流生态基流无法保证时增加河流生

态基流,维护河流生态健康.在渭河流域有99%的流域面积都是地下水补给河水,这就满足了山间河谷型调蓄模式的基本条件,同时在河流两侧有着广阔的河流阶地,可以为洪水调蓄提供入渗场地,在入渗过程中通过数学计算控制好回灌量就不会引起由于洪水入渗而造成的地面沉降、边坡稳定性、土壤盐渍化等问题.但是,河水是一种高泥沙含量的水资源,在回灌过程中会引起入渗介质的堵塞问题.1984年马里兰州修建了207个地下水回灌系统,两年后就有33%的回灌设施因堵塞而停止使用,1990年又有17%的回灌设施停用.在国内,堵塞问题同样是回灌系统的“克星”.1981年北京市曾经建立了64个回灌系统,至1999年只有13个在正常使用,其余51个回灌系统全部报废,核心问题就是堵塞.由此可见,要保障引洪入渗系统的正常运行就必须解决堵塞问题.N. R. Siriwardene等在实验室研究砾石过滤系统的堵塞问题,实验结果说明如果回灌水位保持恒定水位高度,那么堵塞的过程要比变化水位高度的堵塞过程缓慢;而且砾石渗透系统的物理堵塞主要由直径小于6  $\mu\text{m}$ 的颗粒产生<sup>[7]</sup>.同时,也要考虑河水水质遭到污染时对地下水的影响问题.Belinda E. Hatt等人通过研究得出结论,在雨洪入渗系统中,0.5 m厚的砾石层(砾石粒径为10.5 mm)可以有效地过滤并阻止雨洪中的污染物及重金属物质向下运移,但对于可溶性营养物质的过滤能力存在不足<sup>[8]</sup>.洪水回灌造成的堵塞问题降低了入渗介质的渗透能力,恢复渗透能力最直接的办法就是更换介质,但是这种方法的工程量大、成本高.还有就是表面清淤、反向抽水和阶段性回灌等方法.表面清淤用于解决发生表面堵塞的问题,通过对表面发生淤积介质的刮削可以将渗透能力恢复至初始值的70%左右,再用加压水流冲刷介质表面,冲洗掉残留在介质表面的泥沙颗粒.在解决内部堵塞问题上一般采用反向抽水的方法,发生堵塞的泥沙颗粒随水流一起排出.但这些方法仅适用于小规模入渗场地,且工程量大.因此在研究的下一阶段需要针对回灌用水含沙量阈值体系和水体污染的问题进行研究,以完善山间河谷型调蓄模式.

## 参考文献 References

- [1] 王雁林,王文科,杨泽元.陕西省渭河流域生态环境需水量探讨[J].自然资源学报,2004,19(1):69-78.  
WANG Yanlin, WANG Wenke, YANG Zeyuan. Discussion on eco-environmental water demand in Weihe River Basin of Shaanxi Province[J]. Journal of natural resources, 2004, 19(1): 69-78.
- [2] PUSCH Martin, HOFFMANN Andras. Conservation concept for a river ecosystem impacted by flow abstraction in a large postmining area[J]. Landscape and Planning, 2000, 51(2): 165-176.
- [3] DLOVA S N, UZUNOV Y, MANDADIEV D. Low flow-the river's ecosystem limiting factor[J]. Ecological Engineering, 2000, 16(1): 167-174.
- [4] 贾佳.渭河流域基流量的演化及对生态基流的贡献[D].西安:长安大学,2011.  
JIA Jia. Study on the spatial and temporal of the base flow and the contribution of groundwater to the ecological base flow in Weihe River Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [5] 郑爱琴.渭河关中段地下水对河流生态基流的保障研究[D].西安:西安科技大学,2013.  
ZHENG Aiqin. Study on groundwater guarantee to river ecological base flow in Guanzhong Section of Weihe River Basin[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [6] 李云峰,郑书彦,田春声,等.引黄回灌研究[M].西安:陕西科学技术出版社,1996:6-9.  
LI Yunfeng, ZHENG Shuyan, TIAN Chunsheng, et al. The research of Huanghe diversing recharge[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1996: 6-9.
- [7] SIRIWARDENE N R, DELETIC A, FLETCHER T D. Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: insights from a laboratory study[J]. Water Research, 2007(41): 1433-1440.
- [8] HATT B E, FLETCHER T D, DELETIC A. Treatment performance of gravel filter media: implications for design and application of stormwater infiltration systems[J]. water research, 2007(41): 2513-2524.

## Study on the mountain valley storage mode to increase river ecological base flow to regulate model research

ZHANG Wei, WANG Wenke, DUAN Lei, ZHANG Qian

(School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The research is about how to convert "polluted water" into "water resource" by storing flood in mountain valley terrace, so as to increase river ecological base flow and maintain the ecological health of the river. The feasibility analysis of flood storage capacity and storage space, as well as the in-situ test which demonstrates the construction of mountain valley storage system and its storage effectiveness are all included in the research. Through analog calculation, the storage of flood in both aeration zone and aquifer, and the contribution to river ecological base flow are obtained. The result indicates that the storage of floodwater during the in-situ test amounts to 27 815.3  $\text{m}^3$ , of which 38.8% is in aeration zone, 24.9% in aquifer and 36.3% goes into river ecological base flow. After running MODPATH modules, the result shows that the flood starts to supply river ecological base flow 180 days after stagnation.

**Key words:** river ecological base flow; floodwater infiltration; mountain valley storage mode; numerical simulation

(本文编辑 桂智刚)