

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2022.0045

尚文绣,许明一,尚弈,等.龙羊峡水库调度对径流的影响及蓄补水规律[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):451-458. SHANG W X, XU M Y, SHANG Y, et al. Influence of Longyangxia Reservoir operation on Yellow River runoff and its water storage[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(3): 451-458. (in Chinese)

# 龙羊峡水库调度对径流的影响及蓄补水规律

尚文绣<sup>1</sup>,许明一<sup>1</sup>,尚弈<sup>2</sup>,严登明<sup>1</sup>

(1.黄河勘测规划设计研究院有限公司,郑州 450003;2.华北水利水电大学,郑州 450045)

**摘要:**通过对比同一时段内龙羊峡水库入库径流与出库径流的水文变化指标(indicators of hydrologic alteration, IHA)、流量过程变异程度等指标变化,结合突变检验,量化水库调度对径流过程的影响,采用显著性检验识别水库蓄补水与来水、耗水等因素的关系。结果显示,1986—2016年龙羊峡水库调度导致径流过程显著变化:年均流量表现为极值比和变异系数减小;月均流量表现为6—10月减小、11月—次年5月增大;日流量表现为径流过程坦化,但小范围波动加剧。水库出库断面流量过程变异程度在初次蓄水年份发生突变,蓄水后流量过程变异程度是蓄水前的43倍。水库年补水量与黄河天然径流量呈显著负相关关系,与黄河流域地表水耗水量占天然径流量的比例呈显著正相关关系。黄河流域地表水耗水量占天然径流量的比例超过64%时龙羊峡水库以补水为主,反之以蓄水为主。

**关键词:**水库调度;径流过程变化;蓄补水规律;龙羊峡水库;黄河

中图分类号:TV213.2 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



径流是河流的关键组成要素和河流生态服务功能的重要影响因素<sup>[1-3]</sup>。河流天然径流过程一般随时间表现出明显的丰枯变化并具有周期性特征<sup>[4]</sup>,这些变化特征发挥着传输物质、传递信息、塑造栖息地、维持生物生活史模式等作用<sup>[5-6]</sup>。受到人类活动影响,全球河长1 000 km以上的河流中约2/3处于非自然流动状态<sup>[7]</sup>,很多河流的径流过程已经发生了显著变化<sup>[8-9]</sup>。

水库通过调蓄河川径流实现供水、防洪、发电等功能,是改变河流天然径流过程的主要原因之一<sup>[10-12]</sup>。随着人类社会对供水安全保障和电力的需求不断增长,水库数量快速增长<sup>[13]</sup>,世界上已建在建坝高超过30 m的大坝已超过1.5万座<sup>[14]</sup>。2019年我国已建成大中型水库4 722座,总库容超过8 000亿m<sup>3</sup>。水库建设运行直接改变了河流径流过程,进而改变物质输移、生物迁徙、水文循环等过

程,对河流生态健康造成复杂影响<sup>[15-17]</sup>。量化水库对径流过程的影响是识别水库生态影响、提升水库生态保护功能的基础。当前研究<sup>[9,18-20]</sup>中,评价水库对径流过程影响的主要方法是量化水库运行前和运行后两个时段的径流过程关键特征,将关键特征的差异作为水库的影响。但是河流水文情势受到气候变化、工程调节、取水、退水等多因素的复合影响<sup>[21-23]</sup>,对比水库运行前后的径流过程变化反映的是多因素的共同作用,并不能得到水库调度这一单一因素发挥的作用。

位于黄河上游的龙羊峡水库是黄河干流上唯一一座多年调节水库,控制黄河天然径流量的40%以上,调节库容193.6亿m<sup>3</sup>,对黄河径流具有很强的调节能力<sup>[24]</sup>。黄河天然径流量和取用水已经发生明显变化,天然年径流量从580亿m<sup>3</sup>(1919—1975年系列)衰减至490亿m<sup>3</sup>(1956—2016年系列),进

收稿日期:2021-11-23 修回日期:2022-01-11 网络出版时间:2022-01-19

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220118.1724.002.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200203);河南省重大科技专项(201300311400);国家自然科学基金项目(51879240)

作者简介:尚文绣(1990—),女,山东曹县人,高级工程师,博士,主要从事水文学水资源研究。E-mail:wenzhi11191@163.com

入 21 世纪以来黄河取水量增长 80 亿  $m^3$  以上,说明黄河径流过程变化受到多因素影响。2000—2016 年龙羊峡水库入库水文站实测年径流量比 20 世纪 60—90 年代减少了 16.24%,导致难以通过对比水库运行前、后两个时段径流过程变化来准确量化龙羊峡水库的作用。本文对比龙羊峡水库运行后同一时段内入库径流过程和出库径流过程关键特征的差异,结合突变检验,量化龙羊峡水库在黄河径流过程中发挥的作用,并通过显著性检验识别龙羊峡水库蓄补水规律。

## 1 研究方法 with 数据

### 1.1 研究区域

研究对象为位于青海省共和县、贵南县交界处的龙羊峡水库。水库坝址控制黄河流域面积 13.1 万  $km^2$ , 占全流域面积的 17.4%。龙羊峡水库 1978 年开工建设,1986 年开始蓄水。水库的开发任务以发电为主,兼有防洪、灌溉、防凌、养殖、旅游等综合效益。

通过对比同一时段内龙羊峡水库出库径流过程相对于入库径流过程的变化,可以揭示水库调度这

一因素对河流径流过程的影响。选用的水文站监测断面和评价指标见表 1。1986—2016 年唐乃亥断面天然年径流量 186.53 亿  $m^3$ , 贵德断面天然年径流量 187.71 亿  $m^3$ , 两断面天然年径流量仅相差 0.64%, 说明两断面间的区间来水对径流影响很小。

表 1 情景设置

Tab. 1 Scenario setting

情景	水文站监测断面	径流过程关键特征评价指标
入库径流过程	唐乃亥	33 个水文变化指标、1 个流量
出库径流过程	贵德	过程变异程度指标

### 1.2 水文情势变化评价方法

采用水文变化指标(indicators of hydrologic alteration, IHA)<sup>[20]</sup>评价龙羊峡水库出库断面水文情势相对于入库断面水文情势的变化情况,评价时段为 1986—2016 年。IHA 指标体系包含 5 组 33 个评价指标(表 2),分别描述了流量、频率、发生时机、持续时间和变化率等水文情势关键特征。计算 1986—2016 年龙羊峡水库出库断面各 IHA 指标值相对于入库断面相应 IHA 指标值的变化幅度(即偏离度)。

表 2 IHA 评价指标体系

Tab. 2 Indicators of Hydrologic Alteration

组别	类别	指标名称	指标编号
1	月均流量	1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12 月的平均流量	1~12
2	极端流量事件的流量和持续时间	最大 1、3、7、30、90 d 平均流量,最小 1、3、7、30、90 d 平均流量,零流量天数,最小 7 d 平均流量/年均流量(基流)	13~24
3	极端流量事件的发生时机	最大 1 d 平均流量发生日期,最小 1 d 平均流量发生日期	25~26
4	高/低流量脉冲* 的频率与持续时间	高流量脉冲发生次数,低流量脉冲发生次数,高流量脉冲平均持续时间,低流量脉冲平均持续时间	27~30
5	水文过程线变化的变化率和频率	日流量平均上升速率,日流量平均下降速率,日流量变化翻转次数**	31~33

注: \* 为高于天然日径流 75% 分位数的流量为高流量脉冲,低于天然日径流 25% 分位数的流量为低流量脉冲; \*\* 为连续日流量从增大转变为减小时就发生了一次日流量变化翻转,反之亦然。

采用变化范围法(range of variability approach, RVA)评价水文情势变化程度<sup>[25]</sup>。将天然时段各 IHA 指标值的 75% 分位数至 25% 分位数作为 RVA 目标区间<sup>[19]</sup>,水文改变度为

$$D_i = \left| \frac{N_o - N_e}{N_e} \right| \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $D_i$  是第  $i$  个 IHA 指标的水文改变度;  $N_o$  是评价时段内落到 RVA 目标区间的年数;  $N_e$  是评价时段内落到 RVA 目标区间的预期年数,根据本文选择的 RVA 目标区间,预期年数为评价时段总年数的一半;  $i$  是 IHA 指标编号,  $i=1, 2, \dots, 33$ 。水文改变度分为 3 个等级:  $D_i < 33\%$  时代代表无改变或低度改变;  $33\% \leq D_i \leq 67\%$  时代代表中度改变;  $D_i >$

67% 时代代表高度改变。

基于 IHA-RVA 方法,Shiau 等<sup>[26]</sup>提出了整体改变度为

$$D_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{33} D_i^2}{33}} \quad (2)$$

式中:  $D_A$  是整体改变度。

### 1.3 流量过程变异程度评价方法

通过流量过程变异程度表征 1980—2016 年龙羊峡水库入库断面和出库断面实测月径流相对于天然月径流的变化程度

$$F = \sqrt{\sum_{m=1}^{12} \left( \frac{q_m - Q_m}{Q} \right)^2} \quad (3)$$

式中: $F$ 为流量过程变异程度; $q_m$ 为评估年第 $m$ 月实测月径流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $Q_m$ 为评估年第 $m$ 月天然月径流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $\bar{Q}$ 为评估年平均天然月径流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $m$ 为月份的序号, $m=1,2,\dots,12$ 。根据《河湖健康评估技术导则》(SL/T 793-2020)给出的赋分标准,变异程度越小评分越高。流量过程变异程度赋分标准见表3。

表3 流量过程变异程度赋分标准

Tab.3 Flow deviation indicator scoring standard table

流量过程变异程度	$\leq 0.05$	0.1	0.3	1.5	3.5	$\geq 5.0$
赋分	100	75	50	25	10	0

## 1.4 显著性检验方法

采用 $t$ 检验判断龙羊峡水库蓄补水量与黄河天然径流量、黄河流域地表水耗水量占天然径流量的比例之间是否存在显著的线性关系。

提出原假设 $H_0:\beta=0$ 。 $\beta$ 是因变量 $y$ 与自变量 $x$ 之间的线性回归系数, $\beta$ 为0代表 $y$ 与 $x$ 之间没有线性相关关系。构造检验统计量

$$t=b\sqrt{\frac{(n-2)\sum(x-\bar{x})^2}{\sum(y-\hat{y})^2}} \quad (4)$$

式中: $b$ 为基于样本对 $\beta$ 的估计值; $n$ 为样本数量; $\hat{y}$ 为根据线性拟合公式得到的回归预测值。给定显著性水平 $\alpha=0.05$ ,计算临界值 $t_{\alpha/2}(n-2)$ 。如果 $|t|>t_{\alpha/2}(n-2)$ 时,拒绝原假设 $H_0$ ,表明 $y$ 与 $x$ 之间存在显著的线性关系<sup>[27]</sup>。

## 1.5 突变检验方法

采用Mann-Kendall(M-K)检验法<sup>[28]</sup>分析龙羊峡出库断面流量过程变异程度的突变点。对于一组序列长度为 $n$ 的独立序列 $y_f(f=1,2,\dots,n)$ ,构造统计量 $d_f$ 和 $F_f$

$$d_f = \sum_{i=1}^f r_i \quad (5)$$

$$F_f = \frac{d_f - E(d_f)}{\sqrt{V(d_f)}} \quad (6)$$

式中:当 $y_i > y_j$ 时, $r_i=1$ ,否则 $r_i=0$ , $j=1,2,\dots,i$ ; $E(d_f)$ 和 $V(d_f)$ 分别为 $d_f$ 的均值和方差;令 $F_1=0$ 。给定显著性水平 $\alpha=0.05$ ,当 $|F_f|>U_\alpha$ 时,表明序列有显著的趋势变化。 $U_\alpha$ 为概率超过 $1-\alpha/2$ 时标准正态分布的值。

将 $y_f$ 逆序排列,按照式(5)和式(6)得到一组新的 $F_f$ ,再令统计量 $B_f=-F_f$ 。如果 $F_f$ 和 $B_f$ 随 $f$ 的变化曲线有交点,且交点位于 $\pm U_\alpha$ 之间,那么交点为突变发生的时间。

## 1.6 数据来源

龙羊峡水库1980—2016年入库和出库日径流数据来自相应水文站提供的监测断面实测日径流资料。1980—2016年入库和出库天然月径流数据采用水利部黄河水利委员会的径流还原成果。黄河流域历年地表水耗水量来自《黄河水资源公报》。

## 2 龙羊峡水库调度对径流的影响

### 2.1 对年际和年内径流过程的影响

1986—2016年,龙羊峡水库入库最大年径流量327.74亿 $\text{m}^3$ ,最小年径流量105.77亿 $\text{m}^3$ ,极值比3.10,年径流量变异系数0.26。经过水库调蓄后,出库最大年径流量252.88亿 $\text{m}^3$ ,最小年径流量108.61亿 $\text{m}^3$ ,极值比2.33,年径流量变异系数0.19。这说明龙羊峡水库调度减小了年径流量的变化范围和离散程度。

对于年内径流过程,1986—2016年龙羊峡水库入库与出库月均流量见图1。水库调度后:6—10月的月均流量减小6.11亿~14.73亿 $\text{m}^3$ ;11月一次年5月的月均流量增加,其中11月和5月增幅较小,12月一次年4月的月均流量增加5.09亿~8.58亿 $\text{m}^3$ 。

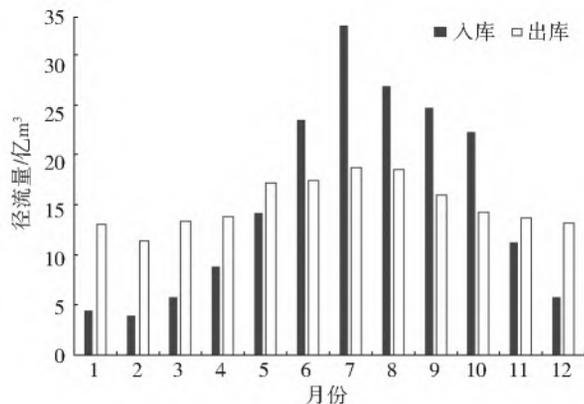


图1 1986—2016年龙羊峡水库入库与出库月均流量对比  
Fig.1 Comparison of monthly average inflow and outflow of Longyangxia Reservoir from 1986 to 2016

### 2.2 对水文情势的影响

对比1986—2016年龙羊峡水库出库径流和入库径流的IHA指标值,结果见图2。指标1~12显示:与入库径流相比,出库径流6—10月的月均流量减小,降幅18.19%~43.15%;11—5月的月均流量增加,其中12—3月增幅超过100%。指标13~21反映了极端高/低流量事件的变化:与入库径流相比,出库径流的最大1、3、7、30、90 d平均流量减小34.74%~47.30%;最小1、3、7、30、90 d平均流量均增大,且随着天数增加,增幅从38.99%增加到

144.43%。龙羊峡水库入库及出库径流均没有发生  
过零流量(指标 23)。出库径流的基流指标比入库  
径流增加 80.24%(指标 24)。指标 25 和 26 反映了  
与入库径流相比,出库径流的最大 1 d 平均流量发生  
日期略推迟,而最小 1 d 平均流量发生日期大幅提  
前。指标 27~30 反映了高/低流量脉冲的变化:与入

库径流相比,出库径流高流量脉冲发生次数增加,但  
平均持续时间缩短,总持续时间缩短约 2/3;低流量  
脉冲的发生次数与平均持续时间均减小,总持续时间  
减小 90%以上。指标 31~33 反映了日流量的变化  
率,与入库径流相比,出库径流的平均上升速率和  
平均下降速率均显著增大,流量翻转次数大幅增加。

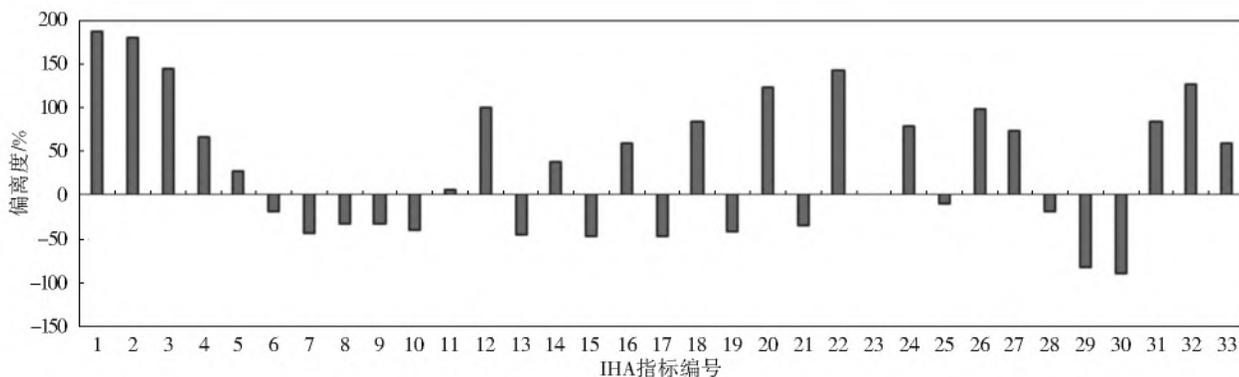


图 2 1986—2016 年龙羊峡水库出库径流相对于入库径流的 IHA 指标值偏离度

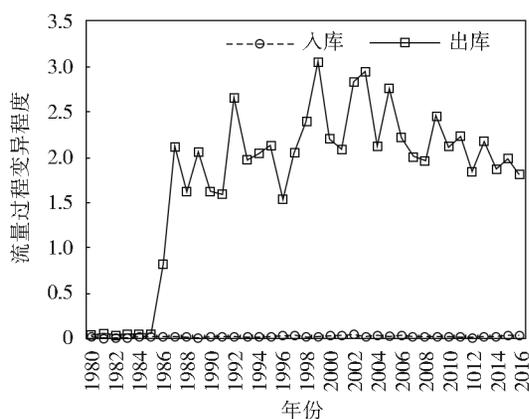
Fig. 2 Deviation degree of IHA value of outflow runoff relative to inflow runoff of Longyangxia Reservoir from 1986 to 2016

与入库径流相比,出库径流的 IHA 指标中有 6  
个发生低度改变,分别为 5、6、8、11 月的月均流量,  
零流量天数和最大 1 d 平均流量发生日期;其他 27  
个指标均为高度改变。出库径流相对于入库径流的  
整体改变度为 95.04%,属于高度改变。

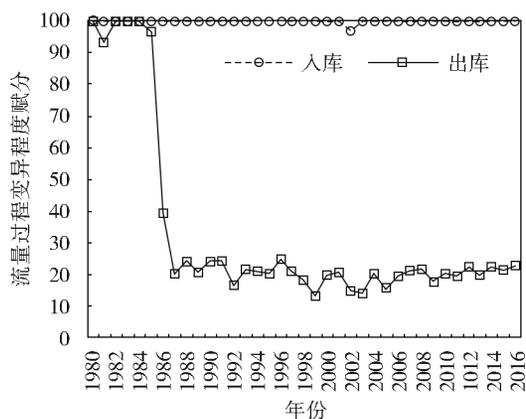
### 2.3 对流量过程变异程度的影响

1980—2016 年龙羊峡水库入库及出库流量过  
程变异程度见图 3。龙羊峡水库入库径流的流量过  
程变异程度始终较低,变化范围为 0.02~0.06,除  
2002 年外流量过程变异程度的赋分均为 100。龙羊

峡水库以上河段用水很少,20 世纪 90 年代以来龙  
羊峡水库以上河段的地表水耗水量仅 1.05 亿~  
2.82 亿 m<sup>3</sup>,不足龙羊峡坝址处天然径流量的 2%,  
不足黄河流域地表水耗水量的 1%,且龙羊峡以上  
黄河干流水库少、调蓄能力弱,因此龙羊峡入库径流  
的流量变异程度很小。2002 年黄河天然径流量仅  
246.16 亿 m<sup>3</sup>,比多年平均值偏低 49.76%,是 1956  
年以来黄河来水最枯的年份,因此,龙羊峡以上河段  
的人类活动对流量过程的干扰相对明显,但这一年  
流量过程变异程度赋分仍高达 97.10。



(a) 流量过程变异程度



(b) 流量过程变异程度赋分

图 3 1980—2016 年龙羊峡水库入库及出库流量过程变异程度及赋分

Fig. 3 Flow deviation indicator value and its score of inflow and outflow of Longyangxia Reservoir from 1986 to 2016

1986 年以前龙羊峡水库出库流量过程变异程度  
及赋分与入库接近,但此后流量过程变异程度迅速大  
幅增加、赋分迅速大幅降低。1980—1985 年龙羊峡  
水库出库流量过程变异程度均值 0.05,赋分均值  
98.29。1987—2016 年龙羊峡水库出库流量过程变异

程度均值 2.15,是 1980—1985 年均值的 43 倍;赋分  
均值 20.14,比 1980—1985 年均值减小了 79.51%。

M-K 检验结果显示,在显著性水平 0.05 的情  
况下,龙羊峡水库出库流量过程变异程度的突变点  
为 1986 年。突变时间与龙羊峡水库开始蓄水的年

份一致。鉴于1986年前后龙羊峡以上河段取水没有发生明显变化,上游也没有大型水利工程投入运行,龙羊峡水库投入运行是导致龙羊峡水库出库断面流量过程变异程度突变的主要原因。

### 3 龙羊峡水库蓄补水规律

#### 3.1 水库蓄补水与来水、耗水的关系

1986—2016年黄河天然径流量及龙羊峡水库补水量见图4。龙羊峡水库最大年蓄水量95.69亿 $m^3$ ,最大年补水量53.74亿 $m^3$ ,年均蓄水4.61亿 $m^3$ 。龙羊峡水库补水量与黄河天然径流量间呈现出反比的变化趋势,表现为天然径流量小的年份水库补水、天然

径流量大的年份水库蓄水。例如:2005年黄河天然径流量为579.88亿 $m^3$ ,比多年平均值(490.00亿 $m^3$ ,1956—2016年系列,下同)偏高18.34%,龙羊峡水库年蓄水95.69亿 $m^3$ ;2006年黄河天然径流量407.16亿 $m^3$ ,比多年平均值偏低16.91%,龙羊峡水库年补水51.83亿 $m^3$ 。对1986—2016年黄河天然径流量和龙羊峡水库年补水量进行线性拟合,拟合公式的斜率为-0.25,相关系数为0.55。对相关关系进行显著性检验, $t$ 值为-3.52,绝对值高于显著性水平0.05时的临界值,说明黄河天然径流量和龙羊峡水库年补水量之间线性关系显著,且为负相关关系。

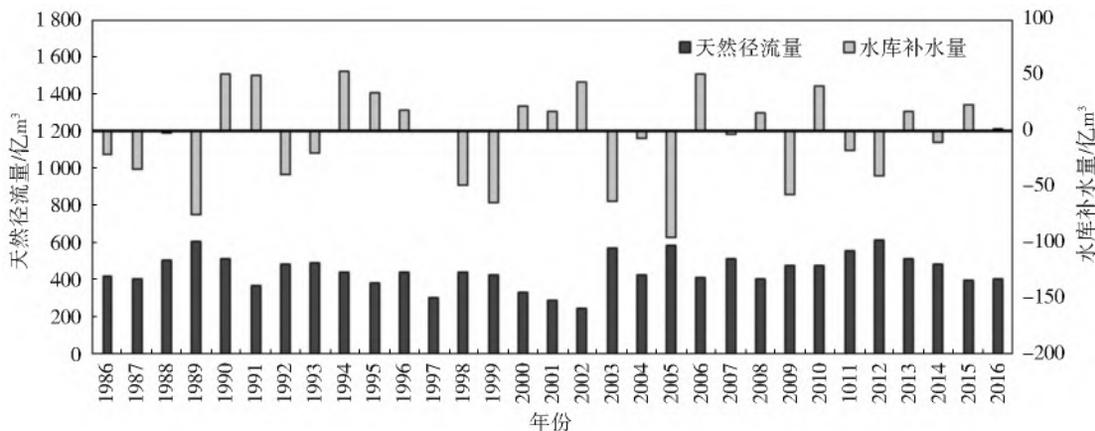


图4 1986—2016年黄河天然径流量及龙羊峡水库补水量

Fig. 4 Natural runoff of the Yellow River and replenishment of Longyangxia Reservoir from 1986 to 2016

1990—2016年黄河流域地表水耗水量占天然径流量的比例见图5。《黄河水资源公报》缺少1996年和1997年地表水耗水量数据,因此不计算这2a地表水耗水量占天然径流量的比例,仅对25a的数据进行分析。对黄河流域地表水耗水量占天然径流量的比例和龙羊峡水库补水量之间的线性关系进行显著性检验, $t$ 值为2.91,高于显著性水平0.05时

的临界值,说明两者线性关系显著,且为正相关关系。统计结果显示,当黄河流域地表水耗水量占天然径流量的比例超过64%时,龙羊峡水库以补水为主,否则以蓄水为主。25a中有13a龙羊峡水库补水,其中11a黄河流域地表水耗水量占天然径流量的比例超过64%;有12a龙羊峡水库蓄水,其中9a黄河流域地表水耗水量占天然径流量的比例低于64%。

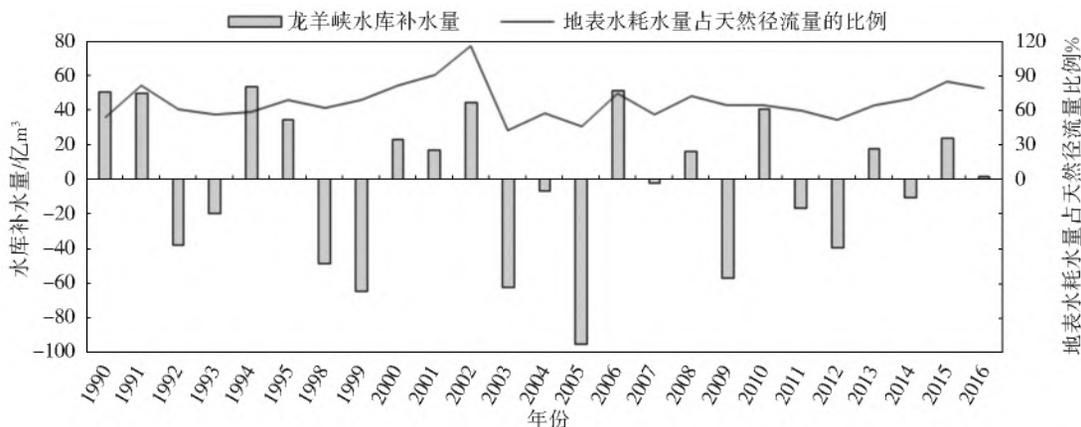


图5 1990—2016年黄河流域地表水耗水量占天然径流量的比例及龙羊峡水库补水量

Fig. 5 Proportion of surface water consumption in natural runoff in the Yellow River basin and water replenishment of Longyangxia Reservoir from 1990 to 2016

### 3.2 水库的蓄丰补枯作用

在多年间蓄丰补枯是多年调节水库的重要任务,分析龙羊峡水库在黄河流域年际蓄丰补枯中发挥的作用。分析时段为 1990—2016 年(不含 1996 年和 1997 年),共计 25 a。1990—2016 年黄河流域年均地表水耗水量占年均天然径流量的 65.44%,但是部分年份占比极大。例如,2000—2002 年连续枯水年占比高达 94.88%,最枯的 2002 年天然径流量仅 246.16 亿  $\text{m}^3$ ,但地表水耗水量达到 286.05 亿  $\text{m}^3$ ,是天然径流量的 116.20%。黄河除了供水外,还需要在河道内分配大量水量用于输沙和生态保护,年均入海水量 154.80 亿  $\text{m}^3$ ,即使在最枯的 2002 年,入海水量也有 41.90 亿  $\text{m}^3$ 。1990—2016 年,有 12 a 黄河流域地表水耗水量与入海水量之和超过了天然径流量,在这些年份必须通过水库补水才能保障河道内、外供水。在 12 a 中有 11 a 龙羊峡水库补水,累计补水 403.19 亿  $\text{m}^3$ ,年均补水 36.65 亿  $\text{m}^3$ 。

2000—2002 年的年均天然径流量仅为 289.31 亿  $\text{m}^3$ ,比多年平均值偏低 40.96%;年均地表水耗水量 274.51 亿  $\text{m}^3$ ,年均入海水量 45.67 亿  $\text{m}^3$ ,天然径流量与河道内外耗水量间存在 30.87 亿  $\text{m}^3$  的缺口。龙羊峡水库在 3 年间累计补水 85.35 亿  $\text{m}^3$ ,年均补水 28.45 亿  $\text{m}^3$ 。如果没有龙羊峡水库调蓄,且维持河道外地表水耗水量不变,那么 2000 年、2001 年入海水量将分别从 48.58 亿、46.53 亿  $\text{m}^3$  减少到 25.25 亿、28.98 亿  $\text{m}^3$ ,2002 年入海水量将为 0。黄河天然径流量年际变化大,易发生连续枯水年,而受到河流含沙量大的影响,黄河干流中下游修建多年调节水库的难度大,作为黄河干流唯一一座多年调节水库,龙羊峡水库的蓄丰补枯对保障流域供水安全和黄河健康生命意义重大。

## 4 结 论

本文研究了 1986—2016 年龙羊峡水库出库径流的 IHA、流量过程变异程度等指标值相对于入库径流的变化,并识别了水库蓄补水与来水、耗水等因素的相关关系。得到以下结论:

龙羊峡水库显著改变了出库径流过程,出库径流相对于入库径流的整体改变度达到高度改变,突出表现为流量波动范围减小,包括年径流量极值比减小 24.84%、年径流量变异系数减小 26.92%、极端高流量事件的流量量级减小 34.74%~47.30%、极端低流量事件的流量量级增大 38.99%~144.43%等,但日流量的变化加快、波动加剧。

龙羊峡水库蓄水导致出库断面径流过程严重偏

离天然情况。水库出库断面的流量过程变异程度在水库初次蓄水的 1986 年发生突变,1980—1985 年和 1987—2016 年两个时段出库断面流量过程变异程度分别为 0.05 和 2.15,赋分分别为 98.29 和 20.14。

龙羊峡水库年补水量与黄河天然径流量、黄河流域地表水耗水量占天然径流量的比例之间均存在显著的线性关系,其中水库补水量与黄河天然径流量间呈负相关关系。在龙羊峡水库补水的年份中,有 84.62% 的年份黄河流域地表水耗水量占天然径流量的比例超过 64%。在龙羊峡水库蓄水的年份中,有 75.00% 的年份黄河流域地表水耗水量占天然径流量的比例低于 64%。

### 参考文献(References):

- [1] POFF N L. Beyond the natural flow regime? Broadening the hydro-ecological foundation to meet environmental flows challenges in a non-stationary world[J]. *Freshwater Biology*, 2018, 63(8): 1011-1021. DOI: 10.1111/fwb.13038.
- [2] 董哲仁,张晶,赵进勇. 环境流理论进展述评[J]. *水利学报*, 2017, 48(6): 670-677. (DONG Z R, ZHANG J, ZHAO J Y. Comments upon progress of environmental flows assessments[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(6): 670-677. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20161056.
- [3] POFF N L, RICHTER B D, ARTHINGTON A H, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): A new framework for developing regional environmental flow standards[J]. *Freshwater Biology*, 2010, 55(1): 147-170. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2009.02204.x.
- [4] MA Z Z, WANG Z J, XIA T, et al. Hydrograph-based hydrologic alteration assessment and its application to the Yellow River[J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2014, 23(1): 1-13. DOI: 10.3808/jei.201400252.
- [5] BUNN S E, ARTHINGTON A H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity[J]. *Environmental Management*, 2002, 30(4): 492-507. DOI: 10.1007/s00267-002-2737-0.
- [6] 张晶,董哲仁,孙东亚,等. 基于主导生态功能分区的河流健康评价全指标体系[J]. *水利学报*, 2010, 41(8): 883-892. (ZHANG J, DONG Z R, SUN D Y, et al. Complete river health assessment index system based on eco-regional method according to dominant ecological functions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(8): 883-892. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2010.08.002.
- [7] GRILL G, LEHNER B, THIEME M. Mapping the world'

- s free-flowing rivers[J]. *Nature*, 2019, 569(7755): 215-221. DOI: 10. 1038/s41586-019-1111-9.
- [8] UDAY KUMAR A, JAYAKUMAR K V. Assessment of hydrological alteration and environmental flow requirements for Srisailem dam on Krishna River, India [J]. *Water Policy*, 2018, 20(6): 1176-1190. DOI: 10. 2166/wp. 2018. 203.
- [9] 张飒, 班璇, 黄强, 等. 基于变化范围法的汉江中游水文情势变化规律分析[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(7): 34-43. (ZHANG S, BAN X, HUANG Q, et al. Analysis of hydrological regime changes in the midstream Han River using range of variability approach [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(7): 34-43. (in Chinese)) DOI: 10. 11660/slfdbx. 20160704.
- [10] POFF N L, SCHMIDT J C. How dams can go with the flow [J]. *Science*, 2016, 353(6304): 1099-1100. DOI: 10. 1126/science. aah4926.
- [11] POFF N L, OLDEEN J D. Can dams be designed for sustainability? [J]. *Science*, 2017, 358(6368): 1252-1253. DOI: 10. 1126/science. aaq1422.
- [12] NGOR P B, LEGENDREC P, OBERDORFF T, et al. Flow alterations by dams shaped fish assemblage dynamics in the complex Mekong-3s river system [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 88: 103-114. DOI: 10. 1016/j. ecolind. 2018. 01. 023.
- [13] ZARFL C, LUMSDON A, BERLEKAMP J, et al. A global boom in hydropower dam construction [J]. *Aquatic Sciences*, 2015(77): 161-170. DOI: 10. 1007/s00027-014-0377-0.
- [14] JIA J S. A technical review of hydro-project development in China [J]. *Engineering*, 2016, 2: 302-312. DOI: 10. 1016/J. ENG. 2016. 03. 008.
- [15] MAAVARA T, CHEN Q, VAN METER K, et al. River dam impacts on biogeochemical cycling [J]. *Nature Reviews*, 2020, 1: 103-116. DOI: 10. 1038/s43017-019-0019-0.
- [16] YANG Y, ZHANG M, ZHU L, et al. Influence of large reservoir operation on water-levels and flows in reaches below dam: Case study of the Three Gorges Reservoir [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 15640. DOI: 10. 1038/s41598-017-15677-y.
- [17] 彭少明, 尚文绣, 王煜, 等. 黄河上游梯级水库运行的生态影响研究 [J]. *水利学报*, 2018, 49(10): 1187-1198. (PENG S M, SHANG W X, WANG Y, et al. Research on ecological impacts of the joint operation of cascade reservoirs in the upstream of the Yellow River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(10): 1187-1198. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20180431.
- [18] 张文浩, 瞿思敏, 徐瑶, 等. 泼水水库对黄河径流过程及水文情势的影响 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(3): 61-65. (ZHANG W H, ZHAI S M, XU Y, et al. Influence of Pohe Reservoir on runoff process and hydrological regime of Yellow River [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(3): 61-65. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 10046933. 2021. 03. 010.
- [19] 段唯鑫, 郭生练, 王俊. 长江上游大型水库群对宜昌站水文情势影响分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(1): 120-130. (DUAN W X, GUO S L, WANG J. Impact of upper Yangtze River large-scale cascade reservoirs on flow regime at Yichang Station [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(1): 120-130. (in Chinese)) DOI: 10. 11870/cj-lyzyyhj201601015.
- [20] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174. DOI: 10. 1046/j. 1523-1739. 1996. 10041163. x.
- [21] 韦晓伟, 张洪波, 辛琛, 等. 变化环境下流域气象水文要素的相关性演化 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(6): 17-26. (WEI X W, ZHANG H B, XIN C, et al. Evolution of correlation analysis of hydro-meteorological variables in the basin under changing environment [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Sciences & Technology*, 2020, 18(6): 17-26. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdlq. 2020. 0112.
- [22] 赵菲菲, 张青青, 张宇, 等. 基于贝叶斯网络的黄河径流预测 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(3): 511-519. (ZHAO F F, ZHANG Q Q, ZHANG Y, et al. The Yellow River runoff forecast based on Bayesian network [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Sciences & Technology*, 2021, 19(3): 511-519. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdlq. 2021. 0054.
- [23] 武玮, 徐宗学, 李发鹏. 渭河关中段水文情势改变程度分析 [J]. *自然资源学报*, 2012, 27(7): 1124-1137. (WU W, XU Z X, LI F P. Hydrologic alteration analysis in the Guanzhong reach of the Weihe River [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(7): 1124-1137. (in Chinese)) DOI: 10. 11849/zrzyxb. 2012. 07. 005.
- [24] 罗红春, 冀鸿兰, 牟献友, 等. 黄河石嘴山站水沙变化及趋势分析 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2019, 17(4): 193-201. (LUO H C, JI H L, MOU X Y, et al. Water and sediment changes at the Shizuishan hydrologic station in the Yellow River [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Sciences & Technology*, 2019, 17(4): 193-201. (in Chinese))

- DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2019.0101.
- [25] 武心嘉,葛金金,戚晓明,等.基于RVA法的沙颍河周口段水文情势评价[J].南水北调与水利科技,2019,17(5):71-80.(WU X J,GE J J,QI X M,et al. Assessment of flow regime of Zhoukou Section based on RVA method[J]. South-to-North Water Transfers and Water Sciences & Technology,2019,17(5):71-80.(in Chinese)). DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2019.0112.
- [26] SHIAU J T,WU F C. Pareto-optimal solutions for environmental flow schemes incorporating the intra-annual and interannual variability of the natural flow regime [J]. Water Resources Research, 2007, 43: W6433. DOI:10.1029/2006WR005523.
- [27] 姜瑶,徐宗学,王静.基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比[J].水利学报,2020,51(7):845-857.(JIANG Y,XU Z X,WANG J. Comparison among five methods of trend detection for annual runoff series[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7):845-857.(in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxh.20200066.
- [28] 田小靖,赵广举,穆兴民,等.水文序列突变点识别方法比较研究[J].泥沙研究,2019,44(2):33-40.(TIAN X J,ZHAO G J,MU X M,et al. Comparison study on hydrological time series change-point testing methods[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(2):33-40.(in Chinese)) DOI:10.16239/j.cnki.0468-155x.2019.02.005.

### Influence of Longyangxia Reservoir operation on Yellow River runoff and its water storage

SHANG Wenxiu<sup>1</sup>, XU Mingyi<sup>1</sup>, SHANG Yi<sup>2</sup>, YAN Dengming<sup>1</sup>

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;

2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

**Abstract:** Reservoir operation is an important cause of runoff process alteration. Quantifying the influence of reservoir on runoff process is the basis of identifying the ecological impact of reservoir and improving the ecological protection function of a reservoir. In previous studies, the main method to evaluate the influence of reservoir on runoff process is to compare the key characteristics of the runoff process in the past and post operation period of a reservoir. However, the river runoff process is influenced by many factors, such as climate change, engineering regulation, water intake, water withdrawal, and so on. Thus, the difference in the runoff process before and after reservoir operation reflects the joint influence of multiple factors rather than only the reservoir.

Longyangxia reservoir, located in the upper reaches of the Yellow River, is the only multi-year regulation reservoir on the mainstream of the Yellow River, having a strong regulation capacity for the runoff. Taking the Longyangxia Reservoir as an example, the difference indicators of hydrologic alteration and flow deviation indicator between the inflow runoff and the outflow runoff of Longyangxia Reservoir from 1986 to 2016 are compared. The influence of reservoir on runoff process was quantified based on the indicator value differences and the Mann-Kendall test. Then a significance test is used to reveal the relationship between reservoir water replenishment, the natural runoff, and the proportion of surface water consumption in natural runoff in the Yellow River Basin.

Results showed that the outflow runoff of Longyangxia Reservoir changed significantly compared with the inflow runoff from 1986 to 2016. For mean annual flow, the extreme value ratio decreased by 24.84% and the coefficient of variation decreased by 26.92%. For mean monthly flow, it decreased from June to October while increased from November to May. For mean daily flow, the runoff process became smoother but small-scale fluctuation increased. The annual maxima 1, 3, 7, 30, and 90 day mean decreased 34.74%~47.30%; the annual minima 1, 3, 7, 30, and 90 day means increased 38.99%~144.43%; the means of all positive differences between consecutive daily values, the mean of all negative differences between consecutive daily values and the number of flow reversals increased significantly. Among the 33 indicators of hydrologic alteration, 27 indicators were highly altered. The overall degree of hydrologic alteration was 95.04%, meaning the outflow runoff of Longyangxia Reservoir was highly altered compared with the inflow runoff. The operation of Longyangxia Reservoir led to a serious deviation of the runoff process from the natural situation. The result of the Mann-Kendall test showed that the value of the flow deviation indicator of reservoir outflow runoff mutated in 1986 when Longyangxia Reservoir firstly impounded water. The mean value of the flow deviation indicator after impoundment was 43 times that before impoundment. From 1980 to 1985, the mean value of flow deviation indicator was 0.05, while from 1986 to 2016, the mean value of flow deviation indicator increased to 2.15.

Longyangxia Reservoir changed the runoff process of the Yellow River by impounding and replenishing water. It was revealed that there was a significant negative correlation between the annual replenishment of Longyangxia Reservoir and the natural runoff of the Yellow River, while there was a significant positive correlation between the annual replenishment of Longyangxia Reservoir and the proportion of surface water consumption in the natural runoff in the Yellow River basin. From 1986 to 2016, when the proportion of surface water consumption in natural runoff in the Yellow River basin exceeded 64%, the year that Longyangxia Reservoir replenished water took up 84.62%. When the proportion of surface water consumption in natural runoff in the Yellow River basin was below 64%, the year that Longyangxia Reservoir impounded water took up 75.00%. The Longyangxia Reservoir played an important role in ensuring the social water supply and river ecological water supply in dry years.

**Key words:** reservoir operation; runoff process alteration; water storage and replenishment rules; Longyangxia Reservoir; Yellow River