

# 不同类型水库对库区及河道水温的影响

唐旺, 周孝德, 袁博

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 水库运行方式是引起河流水文情势和水体热量变化的人为可控因素。选取两个不同类型的调节型水库, 通过对比它们的水温实测资料和水温模型模拟结果, 分析了不同类型水库对水温的影响特征。研究表明, 对多年调节水库而言, 在枯水年高水位时, 汛期库区垂向水温呈稳定的 3 层分布, 底层水温变幅较小, 受水库调节, 下泄水体水温过程相比天然河道坦化作用明显, 彻底改变了天然水温季节性高低分明的正弦分布规律; 在平水年低水位时, 非汛期水库垂向水温分布为混合型分布, 汛期为两分层分布, 底部没有恒温层, 下泄水体对河道水温影响较小; 丰水年中水位运行对水温的影响介于前两者之间; 对于年调节水库而言, 在丰水年和平水年对水温的影响基本一致, 而在枯水年升温期下泄水体升温与前两者相比明显滞后。因此, 应关注不同类型水库运行方式对水温的影响差异, 通过设置合理的水库运行方式可以避免对下泄低温水的负面影响。

**关键词:** 水库运行方式; 水温模型; 库区水温分布; 下泄水温

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)06-0184-05

中图分类号: TV697.2

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.040

## Influence of Different Types of Reservoirs on Water Temperature in Reservoir and Its Downstream River

TANG Wang, ZHOU Xiao-de, YUAN Bo

(State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area,  
Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** The operation mode of reservoir is one of the factors that can be controlled by human, and it will cause hydrology and heat changes in the river. The water temperature characteristics of different operation methods were analyzed based on the measured data and simulation results by taking two different types of regulation reservoirs as an example. The result indicated that when multi-year regulating reservoir running on a high-water level in the flood season of the dry year, there would be a stable three-layer of vertical water temperature phenomenon and small changes on the bottom cryosphere, also an obviously flat phenomenon of the discharged water temperature thoroughly changed the sine distribution rule of natural water varying with the season. The vertical temperature of reservoir was mixed distribution in the dry season and dual stratification distribution in the flood season without cryosphere in bottom when the reservoir running on a lower water level in the average year. Meanwhile, the discharged water had little impact on the down-stream river water temperature. Moreover, the effects on water temperature are between the former two while the reservoir running on a middle-water level of the flood year. As to the multi-year regulating reservoir, there were little differences on water temperature distribution in the flood year or the average year, but an obviously delay of the discharged water temperature in the warming up time of the dry year. Therefore, different operation modes should be taken into consideration and the negative effect of cold water can be avoided by setting the reservoir on an appropriate operation mode.

**Keywords:** operation mode of reservoir; water temperature model; distribution of water temperature; discharged water temperature

收稿日期: 2014-03-24

修回日期: 2014-05-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄河上游龙刘段梯级水库群水温累积效应研究”(51179151)

作者简介: 唐旺(1976—), 男(汉族), 重庆市人, 博士研究生, 研究方向为环境水力学。E-mail: pipipa998@xaut.edu.cn.

通信作者: 周孝德(1960—), 男(汉族), 江西省玉山县人, 博士, 教授, 主要从事水资源保护和环境水力学方面的研究。E-mail: zhouxid@mail.xaut.edu.cn.

水库为了满足防洪、发电和供水等多功能的要求而设定了不同的运行方式,通过对天然径流的调控实现了水资源的充分利用,然而,水库运用在改变了天然河流的水文情势同时也对热量进行了时空分配,引起了水温在流域沿程和水深上的梯度变化<sup>[1]</sup>,进而对水生生态系统产生了不同程度的影响。因此,水库水温变化与水库运行方式密切相关。在影响水库水温分布的诸多因素中,水库运行方式是人为可控因素,水库调度是依据水库不同用水目标而设置用水过程,不同的出入库流量及运行水位和取水口位置的改变都会对库体内水温分布及下泄水温产生不同影响。Neumann<sup>[2]</sup>提出了一套决策支持系统对水库下泄水体进行调控,并在秘鲁的 Truckee 河上进行应用以保障夏季下游河道水温满足鱼类生存和繁殖的要求。邓云<sup>[3]</sup>等分析了水库调度方案调整对下游河道水温的不同影响,研究表明在4—6月升温期加大泄流量,引水口可获得更多的表层温水,从而提高下游水温避免对鱼类生存的不利影响。陆俊卿<sup>[4]</sup>等对比了各典型年在不同取水口高程条件下水库下泄水温的差别,为该电站运行方式设定提供依据;郝红升<sup>[5]</sup>等探讨了不同的取水口高程对水库水温结构的影响,指出库区水温分布结构随着取水口高程的变化而不同,通过水库分层取水可以减轻水库下泄低温水的不利影响。张士杰<sup>[6]</sup>等模拟水库出水位置下移对的水温结构的改变,其结果显示中层均温层垂向厚度增加对库底水温的干扰增强。水库按运行特性通常划分为多年、年、季及月、日等调节方式,水库的调节程度愈高,对天然水温过程的影响就越大<sup>[7]</sup>,对于水温年周期的变化规律,年际调节和年调节(包括不完全年调节)的水库对水温的影响是最为显著的<sup>[8]</sup>。因此,本研究选用这两种类型的水库为例,通过已有实测水温资料和模拟的库区垂向水温分布结果,分析不同的运行方式对库区的水温变化以及下游水温的影响特征,为兼顾河流生态系统需求的水库调度提供依据。

## 1 工程概况及水库运行特征

多年调节型水库以黄河干流的龙羊峡水电站为例,该水库具有约20 a的水库运行资料,其上下游水文站均有水温观测;对于年调节型水库选取黄河干流已规划的宁木特水电站,其运行条件依据工程设计给出的水文调度过程。

### 1.1 工程概况

龙羊峡水电站位于青海省共和与贵南两县交界的龙羊峡峡谷进口约2 km处,坝址处天然年平均径

流量 $2.08 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,坝高178 m,水库正常蓄水位为2 600 m,对应库容 $2.47 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,回水长度108 km,死水位2 530 m,发电引水口高程2 512 m,坝前正常蓄水位对应水深154 m,水库主要承担发电、防洪、防凌和供水等综合用水任务。宁木特水电站位于青海省河南县宁木特乡和玛沁县黄河干流界河上,距下游龙羊峡水电站515 km,坝址处天然年平均径流量 $1.50 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,最大坝高139 m,水库正常蓄水位3 410 m,相应库容 $4.46 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,年调节性能,水库回水长度157.3 km,发电引水口高程3 360 m,坝前正常蓄水位对应水深130 m。

### 1.2 水库运行特征

水库运行方式是根据水库来流量变化考虑其综合用水要求进行设定,水库入流水文条件和运行水位是水库对径流调控的基本参数。为对比不同水库的运行方式对水库水温分布影响的特征,将龙羊峡水库运行方式表征为水库典型运行水位,宁木特水库为3种典型年来水条件组合工况。两个水库不同典型年水库运行特征详见表1,年内不同典型年水位变化过程如图1所示。龙羊峡水库由于建库后黄河来水较枯,基本在较低水位运行,仅有4 a水量超出多年平均径流量,直至2005年底水库蓄至历史最高水位2 596 m。考虑到已有的水文和水温资料,水库来水条件选取水库相对丰、平和枯的3个典型年<sup>[9]</sup>,各运行条件下出水均用于发电。同时,这3个年份水库运用过程也可对应水库从低水位向中、高水位过渡的过程。宁木特水电站是年调节类型,调度规则是汛前12月—5月水库从正常蓄水位3 410 m逐渐放水至死水位3 380 m,汛期水库蓄水逐渐从最低水温3 380 m升至正常蓄水位3 410 m。3种典型年出入库用水过程年内出入库水量平衡,在丰水年和平水年汛期有一定弃水,基本为发电出水,枯水年无弃水。

## 2 研究方法

龙羊峡水电站库区水温分布特征以1992和2006年两个典型年实测水温结构来分析,两个典型年水库运行水位相差大,由于水温资料不全,2006年给出3—10月库区水温分布。同时,为反映水库下泄水流对河道水温的不同影响效应,选取3个典型年运行工况下其下游的贵德水文站断面的观测水温与建库前天然水温进行对比,观测水温可以代表龙羊峡水电站下泄水温的特征,天然水温以当年水库上游唐乃亥水文站的水温值按水库建库前唐乃亥站与贵德站多年水温数据的相关分析推求同期贵德站的水温值。

表 1 不同典型年水库运行参数

水库名称	典型年条件	入库平均流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	出库平均流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	最低水位/ m	最高水位/ m
龙羊峡水电站	丰水年(2005年)	791	496	2 559	2 597
	平水年(1992年)	624	485	2 533	2 569
	枯水年(2006年)	465	618	2 580	2 595
宁木特水电站	丰水年	718	718	3 380	3 410
	平水年	515	515	3 380	3 410
	枯水年	398	398	3 380	3 410

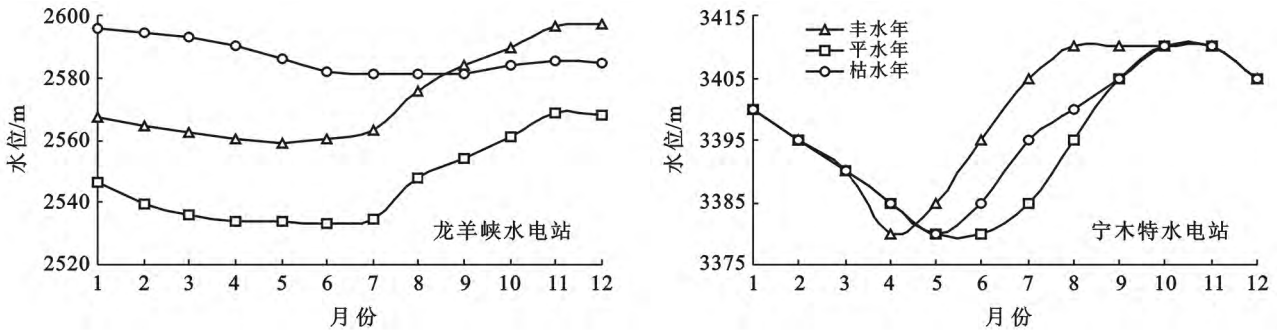


图 1 水库不同典型年水库水位变化过程

宁木特水电站库区水温分布采用三维数学模型进行水库建模模拟。模型主要控制方程包括水流连续、动量、能量传输、温度对流扩散和状态方程。水动力学计算采用交替方向隐式迭代法(ADI)对质量及动量守恒方程进行积分,对其产生的数学矩阵将采用双精度扫描法进行求解。计算模拟范围为坝址至库区回水末端(坝址以上约 157 km),采用三维矩形网格,尺寸为 800 m×100 m×5 m(纵向×横向×垂向),计算区域网格数共 8 092 个,计算时间步长 30 s。模拟时段为各工况库区全年内水温计算。

上游边界条件采用年内各月入库流量,下游边界条件依据年内各月水库发电引水量和水库弃水量给定,气象边界条件采用该地区气象站多年月平均资

料,气象条件和入库水温见表 2。

宁木特水电站下游 515 km 是龙羊峡,以 2006 年在龙羊峡水库坝前作了 9 次实测水温为参照,调试参数,主要考虑两个方面,其一是紊动闭合模型的参数  $C_s$ ,其二是水面和大气的热量交换模型内的参数。大气的热量交换考虑对流产生热量、蒸发潜在的热量、净短波辐射和净长波辐射等 4 个方面作用,依据当地气象资料和水体特征设定水库表面与大气的热量交换热量经验常数<sup>[8]</sup>,道尔顿常数  $a_1$  和  $b_1$  为 0.7 和 0.9,埃斯特朗太阳系数  $a_2$  和  $b_2$  为 0.295 和 0.451,吸收的光能系数为 0.5,消光系数 0.6。初始流场为静止状态,初始温度场设定为典型年 4 月初,假定水库垂向水温为 4 °C 分布均匀场。

表 2 宁木特水电站气象参数及入库水温

项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
气温/°C	-12.3	-8.7	-3.5	1.3	5.3	8.3	10.2	9.5	6	0.9	-6.1	-10.9
风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	1.8	2.4	2.9	2.9	2.9	2.7	2.3	2.1	2.2	2	1.8	1.6
湿度/%	55	53.3	56.3	60.7	67.7	72.3	76	76.7	76.7	70.7	60.3	55.3
入库水温/°C	0.1	0.1	0.4	5.5	9.6	12.7	14.5	14.7	11.8	6.9	1.7	0.1

### 3 结果与分析

#### 3.1 龙羊峡水电站水温分析

由 1992 和 2006 年库区水温分布情况可以看出,相对正常蓄水位 2 600 m,1992 年为低水位运行,由于水库处于高寒地区,入流水温较低,非汛期来流量

较少,库区呈现低温水的混合型分布,6 月初水位处于全年最低,水面距发电引水口位置较近,表层水平流动较强,此时表层水面以下近 20 m 为 15 °C 恒定的表温层,7 月入库流量显著增大,入流水温进一步升高,温跃层下移,对应的温度梯度降低。8 月入库流量有所下降,入流水温为全年最高,垂向水温呈现上

部水温对底部水温的干扰增强,库底部没有明显的滞温层,9月后来流量与上月相当,而入流水温进入降温期,随着表层水温与底部水温逐步接近,分层减弱,10月向混合状态转变。总体看来,1992年5—10月水库为稳定分层,其它月份为混合型分布,由于汛期水库运用为蓄水过程,水位变化大,水库水温变化受入流水温影响显著,水温分层结构为表温层和温跃层两分层分布,由发电引水口高程对应水温过程来看,下泄水体水温依然为正弦分布规律。2006年水库在高水位运行,由于底部蓄存大量较低温水体,5月前基本为混合型分布,6月表面等温层较薄,以下为较厚的温跃层,底部水温仅有 $6^{\circ}\text{C}$ 左右;7月入库水温为全年最高,由于水位波动较小,入流热能和表面热通量不足以改变表层与下部水温的交换,温跃层随着表温的升高有一定下移,温度梯度增大;8月进入降温期,表温层水温降低,温跃层继续下移,9—10月入库水温降温明显,表层水温显著增厚,温跃层下移加快,随着表温与底部水温接近,温跃层变薄,温跃层底部水温有所上升。可以看出,水库在高水位运行,水深较大,水位变幅小,库区垂向水温分布在6—10月为稳定的3分层,由发电引水口高程对应水温过程来看,下泄水体水温变幅在 $3^{\circ}\text{C}$ 左右,彻底改变了天然河道水温季节性高低分明的正弦分布规律。

龙羊峡水电站3个典型年工况条件下,其下游的贵德水文站的观测水温与天然水温变化如图2所示。从图2可以看出,各工况天然水温仅在7月份水温有较大差异,呈现为明显的正弦分布规律。平水年低水位运行时,观测水温与天然水温相比,年内水温变幅减少了 $4.7^{\circ}\text{C}$ ,最低温升幅和最高温降幅基本相同;在3—8月河道水温升温延迟的现象显著,观测水温低于天然水温,最大温差值出现在5月为 $4.6^{\circ}\text{C}$ ;其余月份相反,冬季下泄水体的升温体现了水库的调蓄储热作用。丰水年中水位运行时,观测水温年内变幅比天然水温减少 $1/2$ 以上,各月水温趋于均化;在4—9月,观测水温低于天然水温,最大温差值出现在7月为 $7.4^{\circ}\text{C}$ ,升温延迟的现象比平水年工况更为明显;其余月份相反,最大温差值出现在12月为 $8.1^{\circ}\text{C}$ ,可以判定丰水年的水文条件和汛期蓄存大量较高温水体是导致冬季水体升温更为显著的根本原因。与平水年工况相比,其对下游水温影响效应有所增大。枯水年高水位运行时,最高水温在9月,出现相位偏移,延迟时间达2个月,观测水温年内变化范围为 $5.2\sim 8.7^{\circ}\text{C}$ ,年内水温变幅降低不足天然水温的 $1/5$ ,反映出水库运用对天然水温的坦化现象非常显著,在4—10月,观测水温低于天然河道水温,最大温

差值高达 $11.4^{\circ}\text{C}$ ;其余月份观测水温高于天然水温,最大温差值为 $6.9^{\circ}\text{C}$ ,可见枯水年高水位运行对天然河道水温的影响效应最为显著。

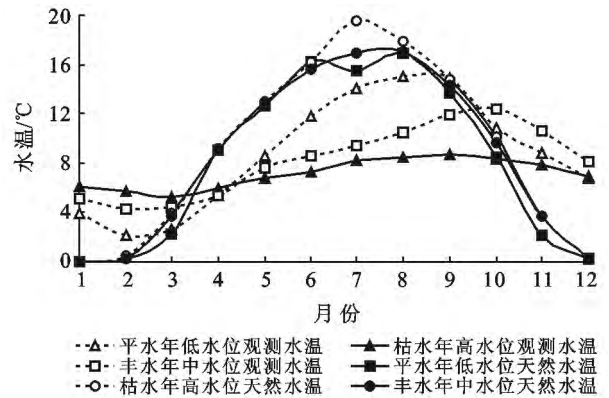


图2 不同典型年贵德水文站的观测水温与天然水温变化

### 3.2 宁木特水电站水温分析

利用已经参数率定过的水温模型模拟宁木特水电站库区3种典型年工况下水温分布,分别提取3种典型年各月坝前垂向水温值。分析得出,9—12月入流水温、气温和太阳辐射的逐渐降低,库区垂向水温表层也随之降低,但底部水温变化不大;1,4月库区垂向水温分布处于混和型,水温表层、底层差异很小;2—3月气温为全年最低,库区表层水体水温较低在 $2^{\circ}\text{C}$ 左右,底部水温仍维持在 $4^{\circ}\text{C}$ ;5月库区水位到达全年最低值,随着入流水温、气温和太阳辐射的逐渐升高,表层水温迅速增长,坝前水温逐渐过渡到分层型;6—8月,库区水体呈现稳定分层状态。各工况同时段相比,枯水年和平水年水库入库水量较小,水温垂向对流交换作用较弱,温度梯度较小;丰水年入库水量较大,表温层随时间推移厚度增大,温度梯度逐渐增大。5—9月是各工况入库来流及水位显著变化时段,致使表层升温变化很大,5—6月枯水年、平水年与丰水年相比,库体水温均呈现一定滞后状态,表温也低于了近 $1^{\circ}\text{C}$ ;7月丰水年入库流量远远大于平水年和枯水年,丰水年水位已回升至 $3405\text{ m}$ ,而平水年和枯水年分别为 $3390$ 和 $3395\text{ m}$ ,表温也较平水年和枯水年高约 $1.2^{\circ}\text{C}$ ;8—10月进入主汛期,均维持在 $3410\text{ m}$ ,水库呈现稳定分层,表温层水温在 $14.5\sim 16^{\circ}\text{C}$ 之间;11—4月期间水位从 $3410\text{ m}$ 逐渐降为 $3380\text{ m}$ ,表温降温幅度明显。可见水电站运行方式变化对水温的影响较大,其中枯水年工况对水温的影响最大。

不同典型年工况下水库下泄水温年内变化如图3所示。由图3可以看出,4—7月宁木特水电站3种工况的下泄水温均低于天然水温,9月至次年2月,

其下泄水温均高于天然水温,3 和 8 月其下泄水温与天然水温基本一致。3 种典型年,丰水年下泄水温与天然最为接近,其次是平水年,相差最大是枯水年,说明了水库枯水年运行下泄低温水流的影响较为显著,这与枯水年在此期间用水过程直接相关。由于枯水年入库流量较小,意味着入库的热能较低;从水位变化来看,1—4 月水位下降期丰水年、平水年和枯水年工况水位变化基本相同,至 4 月初降至最低水位 3380 m,而平水年和枯水年在升温期较高温的入流与库内低温水体对流交换较弱,水位下降较慢又导致了库内低温水出流滞后;5—6 月为涨水期,枯水年库区水位较其余两种工况低,库区水体升温较滞后;然而由于水位接近出流位置,水库处于全年最小的库容,涨水期时段较短,涨幅大,致使各典型年工况出流温差逐渐减小,8 月后下泄水温基本相同,后期各典型年工况水位维持在高水位,水位变幅小,入流条件对库体水温分布和出流水温影响小。因此,宁木特水电站枯水年运行下泄低温水流的影响较为显著。

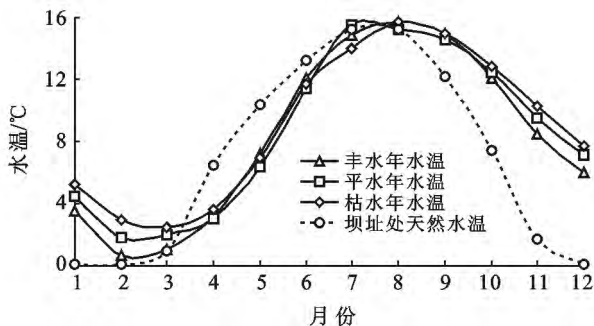


图 3 不同典型年宁木特水电站下泄水流各月水温变化

## 4 结论

(1) 不同运行特征对库区垂向水温分布及下游水温的影响规律差异显著。多年调节水库在枯水年高水位运行汛期库水温垂向分布为稳定 3 分层,底部滞温层的水温变幅很小,而在平水年低水位运行时,汛期为两分层分布,下部水温依然为正弦分布规律。从水库下泄水体水温对河道的影响来看,枯水年高水位运行影响最大,丰水年中水位时次之,平水年低水位时影响最小。同时,年调节水库在丰水年和平水年下垂向水温分布及对下泄流水温的影响差异较小,而在枯水年入库水量较小的升温期,水位升降过程相

比丰水年和平水年较为迟缓,下泄水温变化明显的滞后,也决定了下泄水温较低的情形。因此,在分析水库运行方式对水温影响效应时,应特别关注多年调节型水库在枯水年高水位运行和年调节型水库枯水年升温期用水过程。

(2) 多年调节水库在枯水年高水位运行时,库区水温分布不受当年入流水温过程的影响,其对下游水温影响效应最大,特别是夏季低温水影响效应极为显著,水库在高水位运行应适当考虑降低水位和加大表层出流以减轻对下游河道的水温影响。对于年调节水库运行时,在枯水年升温期运行水位降低时,在兼顾其他用水条件的前提下,尽快将水库蓄存的低温水下泄,并通过增加表层的较高温出流,提前由最低水位开始涨水,以提高升温期入流对库体水温的贡献,减轻水库下泄低温水的对河道水生生态的不利影响。因此,设置合理的水库运行方式避免水库下泄低温水影响将为实际工程中待建水库的规划、调度以及合理开发和利用提供一定的参考和依据。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 刘兰芬. 河流水电开发的环境效益及主要环境问题研究[J]. 水利学报, 2002(8): 121-128.
- [2] Neumann D W, Zagana E A, Rajagopalan B. A decision support system to manage summer stream temperatures[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42(5): 1275-1284.
- [3] 邓云, 李嘉, 李然, 等. 水库调度对溪洛渡电站下游水温的影响[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2006, 38(5): 65-69.
- [4] 陆俊卿, 张小峰, 强继红, 等. 水库水温数学模型及其应用[J]. 水力发电学报, 2008, 27(5): 123-129.
- [5] 郝红升, 李克锋, 李然, 等. 取水口高程对过渡型水库水温分布结构的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 21-25.
- [6] 张士杰, 彭文启. 二滩水库水温结构及其影响因素研究[J]. 水利学报, 2009, 40(10): 1254-1258.
- [7] 蔡为武. 水库及下游河道的水温分析[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(5): 20-23.
- [8] 唐旺, 周孝德, 宋策, 等. 龙头水库方案变化对下游梯级开发的水温累积影响[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(4): 392-397.
- [9] 巴存胜, 赵建英. 龙羊峡水库入库径流特征及周期分析[J]. 青海电力, 2003(4): 4-6.