

DOI: CNKI: 32-1309/ P. 20110514. 1449. 018

龙羊峡水库水温结构演变及其对下游河道水温影响

宋 策, 周孝德, 辛向文

(西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 多年调节水库由于年际运行过程的差异引起水库水温结构变化, 探明其规律及对下游河道水温响应具有重要意义。以黄河龙羊峡水库为研究对象, 利用水库蓄水后的 1988~2008 年运行过程及水温观测资料, 分析了水库运行方式与水温结构变化关系, 探讨了水库不同运用过程对下游河道水温的影响。研究表明: 龙羊峡水库水温结构演变及其对下游河道水温影响程度与水库运用过程密切相关。12~3 月, 水温结构为弱分层或等温分布, 较高水位的蓄热增温效应明显, 下游河道水温与水库水位变化具有同相位关系; 5~10 月, 水温结构为分层分布, 水位是决定分层形态变化最主要因素, 下游河道水温与水库水位变化具有反相位关系, 同时, 水位与河道水温在不同的出入库水量条件下, 呈现不同的线性相关关系。11 月和 4 月, 水温结构近乎为等温状态, 也是水温结构变化的转折点。研究成果为分析大型水库在不同运行条件下水温结构及下游河道水温提供一定的参考依据。

关键词: 黄河; 龙羊峡水库; 水温; 温度分层; 下游河道

中图分类号: P338.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2011)03-0421-08

水温是影响河流生态系统中生物栖息的一个关键性物理限定因素, 其年周期的变化特征决定物种不同的行为特点, 尤其对水生生物的生长、迁移和繁殖起着控制作用^[1]。然而, 在天然河道上开发水电工程使得受干扰河段水温时空分布呈现了显著变化, 在水库调控人为因素和自然因素的双重作用下, 水库水温垂向结构呈现年、季和日变化的不同特征。水库分层的形成使下泄水温与原天然水温存在差异, 进而不同程度影响到下游河道生态系统物质循环和能量流动过程^[2]。

大型水库水温问题研究日益引起人们的重视。李冰冻等^[3]和郭文献等^[4]分别对二滩水库和三峡水库利用原型水温观测分析了年内水温结构及下泄水温的变化特性; 张士杰等^[5]和邓云等^[6]也针对二滩水库利用水温模型进行水温预测, 分析了库区来水流量和水温、大坝出流位置变化以及梯级电站联合运行后对水温分布的影响, 为认识大型水库水温特征提供了参考。同时, 在对三峡水库生态调度目标研究中, 水温被考虑为影响下游中华鲟和四大家鱼产卵期的最重要的一个条件^[7]。Neumann^[8]设计了一套对水库下泄水体进行调控的决策支持系统, 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。近年来水库水温数值模拟也取得了良好的应用效果, 尤其以三维温度场模型模拟水库水温, 更清晰表征了水库水温结构、细部水温特征以及密度流的各向异性特性^[9-11], 为水库水温研究提供了有效手段。目前针对水库水温的研究主要集中于年内的水温规律, 对于具有多年调节能力的水库, 由于各年入流水文条件和用水要求的较大变差, 年际间的水温变化特征尚不清楚, 就特定年份的分析不足以准确判别水库水温结构及对下游水温影响程度。因此, 研究多年调节水库水温结构演变及对下游河道水温影响规律具有重要的意义。本文以黄河干流特大型多年调节水库——龙羊峡水库为例, 依据较长系列的河道和库区水温观测资料, 针对建库后 20 多年水库运行变化, 分析了水库运行响应水温结构变化关系及演化规律, 同时, 探讨了水库下游河道水温的变化特征, 为水电开发的水环境影响评价和兼顾河流生态系统需求的水库调度提供科学依据。

收稿日期: 2010-07-01; **网络出版时间:** 2011-05-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110514.1449.018.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50579061)

作者简介: 宋 策 (1971-), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 主要从事环境水力学研究。E-mail: songcecn@sohu.com

1 水库运行特征及水温观测

1.1 水库运行特征

龙羊峡水库位于青海省境内黄河干流上游，是龙羊峡 - 青铜峡河段已建梯级水电站的龙头水库，工程以发电为主，兼顾防洪、灌溉等综合利用。坝址处天然年平均径流量 208 亿 m^3 ，坝高 178 m，水库正常蓄水位为 2600 m，对应库容 247 亿 m^3 ，回水长度 108 km，死水位 2530 m，发电引水口高程 2512 m，坝前正常蓄水位对应水深 154 m。水库及上下游的唐乃亥和贵德水文站位置见图 1。

龙羊峡水库有效库容与其上游多年平均径流量相当，可以将丰水年多余水量蓄在水库中，以补充枯水年或连续枯水年水量的不足^[12]。建库以来，大部分年份入库径流未达到设计条件，仅有个别年份来水较丰，由于来水偏枯，水库可蓄水量较少，而大部分年份需要水库补水，造成水库长期运用水位偏低。图 2 为蓄水后 1988 ~ 2008 年的水库运行水位过程，此期间水位变动在死水位至正常蓄水位之间，且长期在较低水位附近运行，直至 2005 年末水库蓄至 2596 m(历史最高水位)。

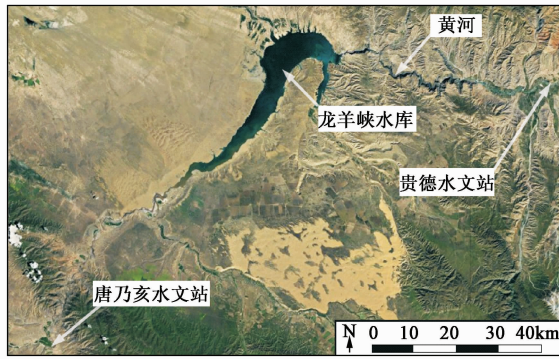


图 1 龙羊峡水库及上下游水文站位置示意图

Fig. 1 Locations of Longyangxia reservoir and hydrological station

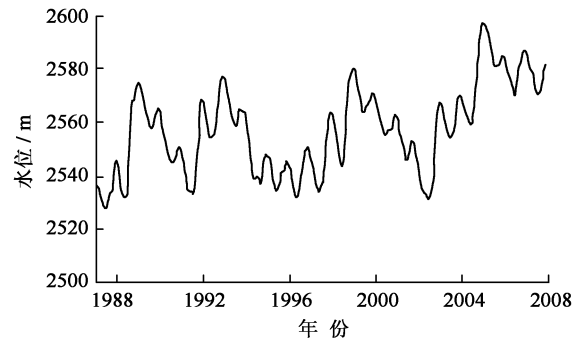


图 2 1988 ~ 2008 年水库运行水位

Fig. 2 Reservoir water levels from 1988 to 2008

1.2 水温观测

龙羊峡水库自 20 世纪 90 年代开展了库区水温观测，选取水库运行较大差异的 1992 年和 2006 年(缺测 4 个月)坝前垂向水温观测数据(图 3)。1992 年水库在较低水位运行，入流水文条件为平水年，入库平均流量

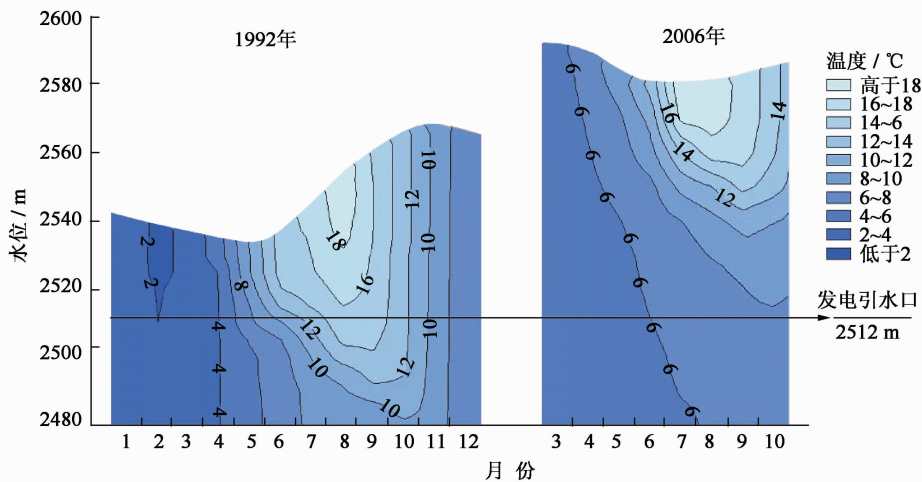


图 3 1992 年和 2006 年坝前垂向水温分布

Fig. 3 Temperature vertical distribution of reservoir in 1992 and 2006

624 m³/s, 年内水位变幅 35.84 m, 汛期为典型的蓄水过程。非汛期水温结构呈现混合分布, 5~10 月为表温层和温跃层两分层分布, 由发电引水口高程对应年内水温过程来看, 下泄水温依然为正弦分布规律。2006 年在较高水位运行, 水文条件为枯水年, 入库平均流量 465 m³/s, 水位变幅小, 仅有 15 m。3~5 月库区垂向水温分布基本为混合向分层过渡, 在 6~10 月为稳定的三分层, 底部存在低温滞温层, 其水温变幅很小, 由发电引水口高程处水温来看, 年内下泄水体水温变幅在 3℃ 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。

贵德水文站为龙羊峡水库的出库控制站, 位于坝址下游 54.9 km 处, 选取 1973~2008 年该站河道水温的观测数据, 见图 4。因水库于 1986 年 10 月下闸蓄水, 1973~1985 年河道水温为天然状态, 年内水温的季节性分布特征显著, 呈正弦曲线规律。多年月均水温范围在 0~17℃ 之间, 最低水温在 1 月, 最高水温在 7 月, 各月水温变幅均值为 2.1℃。1987~2008 年为蓄水后河道水温, 多年月均水温在 3.6~12.8℃ 之间, 各月水温变幅均值为 5.0℃, 各年份年内水温分布差异显著, 尤其在 6~10 月的水温变幅较大, 反映了龙羊峡水库汛期时水库运用变化对下游河道水温影响非常突出。

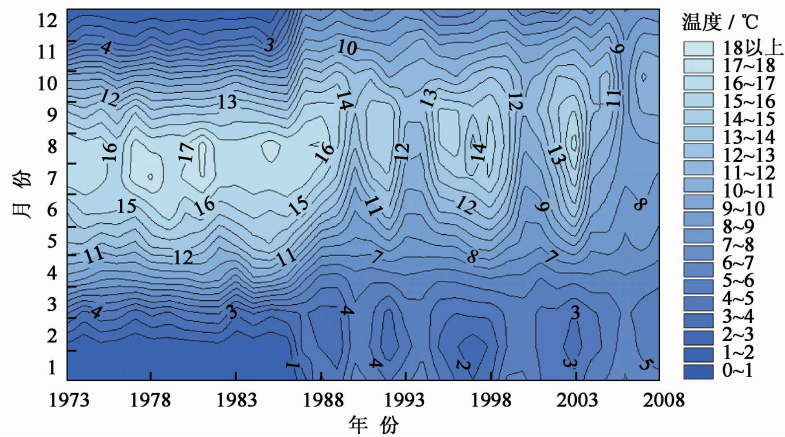


图 4 1973~2008 年贵德站水温

Fig. 4 Water temperature measured at Guide station from 1973 to 2008

2 龙羊峡水库垂向水温结构演化分析

2.1 水库运行过程与水温结构变化关系

鉴于龙羊峡水库库区水温观测资料有限, 特选取 1990~1996 年为研究时段来分析水库运用后水温结构的变化特点, 此时段为一个典型周期年际水库调节过程, 对比了该时段与 1988~2008 年入库和出库多年平均月水温过程如图 5 所示, 入库和出库水温分别采用水库上下游的唐乃亥站和贵德站的观测水温值, 所选时段与蓄水后 21 年的平均水温过程基本相近, 反映了两个时期入流水温条件与水库运用后的出流水温过程基

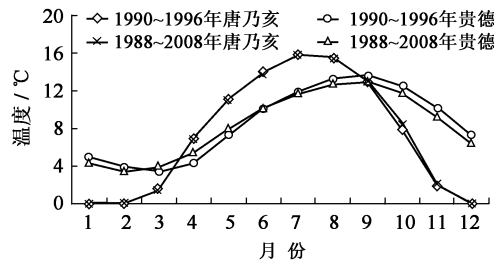


图 5 蓄水后不同时期水文站多年平均月水温对比

Fig. 5 Comparison of monthly water temperature at hydrologic station in different periods after the impoundment

本相当。因此,分析这一时段水温结构变化具有一定的代表性。

统计了1990~1996年水库各月运行特征值与水库水温参数,见图6,其中,由于龙羊峡水库基本无弃水,泄流为单一发电出流,其下泄水温可代表发电引水口处的内部水温。从以下3个方面来分析水库运行变化对水温结构演变的影响。

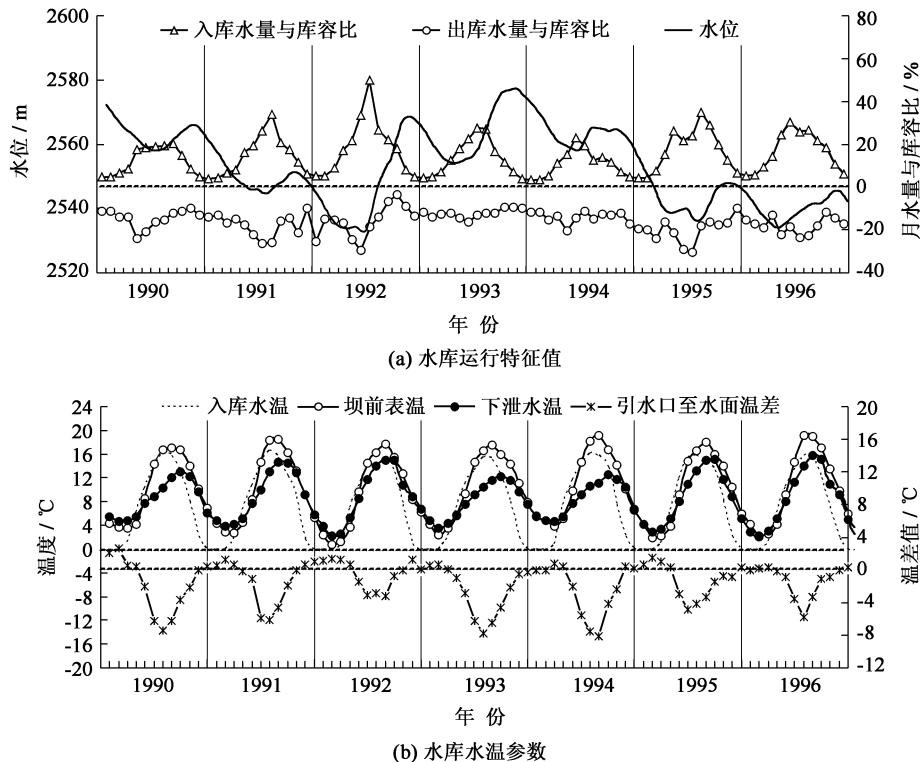


图6 1990~1996年水库运行过程与水温变化

Fig. 6 Temperature changes in process and reservoir operation from 1990 to 1996

(1) 水库热量收支 11月~次年4月,各年份平均入库水温为 $0\sim 6.8^{\circ}\text{C}$,总入流量和出库水量与库容比分别为 $32\%\sim 50\%$ 和 $63\%\sim 96\%$,月水量较为均化,水库输出热量高于输入热量,补水过程决定了降温过程;5~10月,各年份入库水温均值为 $7.9\sim 15.9^{\circ}\text{C}$,总入流量和出库水量与库容比分别为 $95\%\sim 171\%$ 和 $63\%\sim 97\%$,可见水库的储热过程取决于此期间的蓄水过程,水位升幅越大,蓄热量越高,内部水温变化越大,从而使得11月~次年4月在水位较高时对应其内部水温也较高。

(2) 水库水温结构变化 年内不同时段呈现基本稳定的垂向水温结构,11月~次年4月为表层低温的弱分层或等温分布,5~10月为分层分布。由于在11月时水库入流水温与气温骤降,水库垂向水温分布由分层转为混合,12月~次年3月的入库水温在 $0\sim 2.4^{\circ}\text{C}$,至4月升至 6.8°C ,水温分布也接近等温状态,11月和4月是水温结构变化的转折点。5月后水库为蓄水过程,入库水量增大,水温升温较快,水温分布由混合转为分层,各年份水位的高低引起了水库热量的差异,同时也反映了水面与引水口处距离的不同,相对越高的水位,引水口位置距水面距离越远,相近的外部输入热量使库体内部水温变化越小,引水口处至水面的温差越大;相反,起始水位越低,温差则越小。8~10月,入库水温为降温期,表层水温下降快,内部水温升温滞后,引水口至水面温差值逐月减小。

(3) 影响水库水温结构的因素 外部气象条件年际间具有随机性,尤其对水库表层水温具有一定影响,从龙羊峡水库各年份入流水温和坝前表层水温来看,月最高水温差分别为 1.1°C 和 2°C ,变差很小,可认为其引起各年份内部水温结构的差异是有限的。同时,水库几何形状已经定型,运行水位变化在 $2537\sim 2596\text{ m}$ 之间,单一泄流方式,发电引水口位置距水面变差有 60 m ,对库区内部热量变化会有较大影响。水位变

化也决定了蓄热过程的不同,尤其在5~10月水库分层期间,相近出入库水文条件,低水位运行时,来水量大其水位变幅也大,内部水温受入流水温过程影响显著;而高水位运行时,来水较少,其水位变幅小,内部水温变化小。如:1995年与2006年相比,平均水位分别为2541.2 m和2582.9 m,出入库水量相当,内部发电引水口处水温差异显著,其平均水温分别为12.4℃和6.8℃,水温变幅分别为8.5℃和2.4℃。高水位运行时,5~10月水库底部明显呈现稳定的滞温层。可见在水量偏枯相近的条件下,水位是决定龙羊峡水库分层形态变化最主要的因素。因此,龙羊峡水库运用较大差异正是水库呈现不同水温分布最根本的原因。

2.2 龙羊峡水库水温结构变化规律

龙羊峡水库水温结构变化与水库运行过程密切相关,对1988~2008年运用过程进一步分析,可看出水库水温结构的变化特点:

(1) 1988~2002年,水库运行呈现了3个相近的周期性年际变化过程,由于入库径流丰枯度显著,除了1989年、1993年和1999年来水较丰,最高蓄水位超过2570 m,其余年份来水偏枯,蓄水量不足,下游供水的要求致使水库蓄水量下泄,运行水位偏低。假如以年初与年末运用水位基本相当的偏枯年份为基准年,如1995年和1996年,当遇到来水较丰时,水库蓄水,汛期蓄热增温使得库内升温显著,相对基准年,内部水温变化大,更接近表层温度变化,同时,年末也呈现较高的水温。假设下一个年份水库依然能保障年内蓄水,相对在较高水位同等出入流条件下,内部水温增温效应减弱;当来水偏枯时,年内呈现内部水温增温小,变幅也小,与表层温度差较大;水位进一步降低,水库水温变化又接近基准年状况。

(2) 2003~2008年,水库运用呈现与前期不同的特点,由于2003年和2005年来水较丰,总蓄水量近160亿 m^3 ,由于2006~2008年来水偏枯,但水库蓄存较大水量可维持下游用水,水位降幅很小,恰好反映了龙羊峡水库蓄丰补枯的多年调节能力。以2006年平均的入库水量、出库水量和库容与1995年相比,分别为0.92倍、1.05倍和2.44倍,正如上面分析的结果,等温期出现较高的水温,汛期内部增温效应会更弱,底部明显呈现较低温的滞温层;若不出现较丰和持续偏枯的来水,在其后连续年份将持续出现2006年的水库水温分布的特点。

3 下游河道水温的变化特征

3.1 水库运用过程对下游河道水温影响效应

龙羊峡水库单一性泄流特征使得下泄水温与水温结构的变化响应更为明确,依据水库运行过程及年内水温结构特点,考虑到11月和4月是水温结构变化的转折点,以12月~次年3月和5~10月来分析水库运行变化对下游河道水温影响的规律。选取1988~2008年水库水位运行过程及贵德水文站河道月均水温的数据进行统计,见图7。由图7(a)可知,12月~次年3月,河道水温与水库水位具有同相位关系,水温变幅与河道水温呈现反相位关系,由于水温变幅与各月水库运用过程有关,因而变幅值与河道水温存在部分的不一致。由图7(b)可知,5~10月下游河道水温与水库水位具有反相位关系,而水温变幅与河道水温变化呈现同

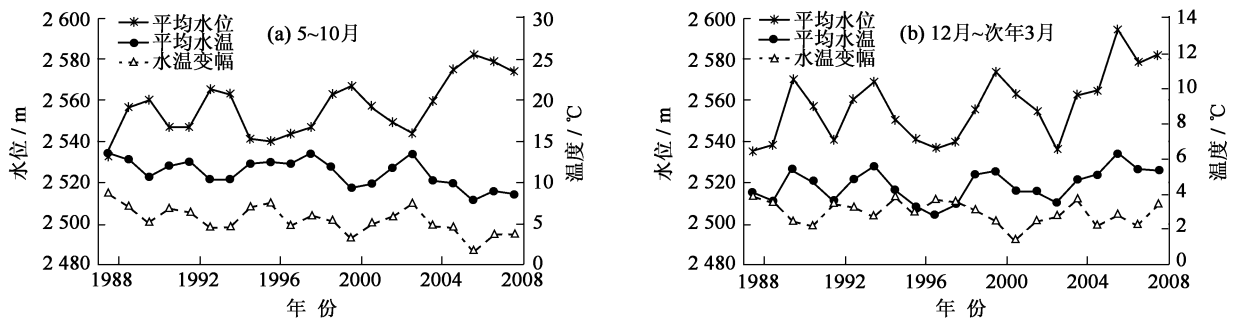


图7 12月~次年3月和5~10月水库水位及下游河道水温

Fig. 7 Reservoirs water level and downstream water temperature in December to March and May to October

相位关系。进一步体现龙羊峡水库运用水位与下游河道水温变化的响应关系极为显著。

以上分析说明水库水位条件是决定下游河道水温变化的主因,同时出入库水量也是影响下游河道水温变化的重要因素。选取1988~2008年5~10月为研究时段,考虑各年此期间出入库水量的特征,入库水量120亿 m^3 以下的13个年份入出库水量比在1.0~1.6之间,入库水量140亿 m^3 以上的8个年份入出库水量比在1.6~2.4之间,对这两组年份分别绘制河道平均水温与水库平均水位的关系曲线,见图8,均具有较好的线性关系,相关系数分别为0.9669和0.8857,前者的相关关系最好,这说明了入库的水量较低时,下游河道水温变化主要由水库运行水位控制。而后者相关关系较差,反映了入库的水量较高时,出入库的水量存在较大变差,使得下游河道水温受出入库水量变化影响。

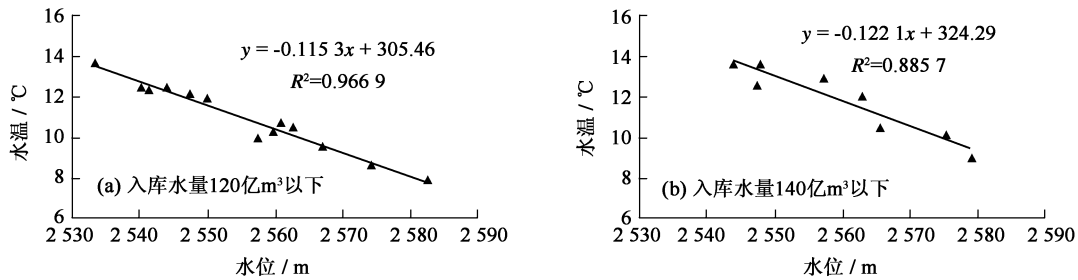


图8 下游河道平均水温与水库平均水位的关系曲线

Fig. 8 Relationships between reservoirs average water level and downstream average water temperature

3.2 下游河道水温变化特点

为反映龙羊峡水库蓄水前后其下游河道水温的变化,统计了1973~1985年水库蓄水前与1988~2008年蓄水后贵德站的水温特征值,见表1,可以看出,在不同水位和入流条件下,对下游河道水温的影响差别显著。蓄水后与蓄水前的水温相比,在12月~次年3月期间,水位升高,入流量增大,河道水温明显提高,水温范围在2.5~8.1 $^{\circ}\text{C}$,变幅增大;在4月,河道水温下降,各工况水温变幅较小;在5~10月期间,河道水温下降,尤其是最低水温值更为明显,高水位偏枯条件下,其值比与蓄水前下降近1倍,而最高水温值也比蓄水前最低水温值低0.5 $^{\circ}\text{C}$ 。在11月份,河道水温明显升高,水温范围在7.2~10.6 $^{\circ}\text{C}$,为蓄水前的2倍以上。整体来看,蓄水后河道水温呈现不同程度的坦化,尤其在低水位偏枯的条件下,年内水温变幅仅有5.2 $^{\circ}\text{C}$,不足蓄水前的1/3。从两个时段最高和最低月水温出现时间来看,水库蓄水后水温过程的延迟现象明显,在较高水位时延迟2~3个月。

表1 龙羊峡水库蓄水前后其下游河道水温特征值

Table 1 Characteristic parameters of downstream water temperature before and after the impoundment

工况	年平均运行水位/m	平均月水温变幅/ $^{\circ}\text{C}$				最高(最低)水温出现时间/月
		12月~次年3月	4月	5~10月	11月	
低水位偏丰(2)	2544.59~2552.85	4.1~7.2	5.7	8.6~16	7.2	8(2)
中高水位偏丰(1)	2562.19	4.5~7.0	5.7	8.2~13.7	10.0	8(2)
高水位偏丰(1)	2574.63	5.2~8.1	5.9	7.6~12.4	10.6	10(3)
低水位偏枯(8)	2535.10~2548.52	2.5~5.9	5.4	8.5~14.9	9.1	8(2)
中高水位偏枯(6)	2559.13~2568.51	3.7~6.3	5.2	7.5~12.2	9.5	9(2)
高水位偏枯(3)	2576.85~2586.13	4.8~7.1	5.5	6.9~10.0	9.0	10(3)
蓄水前	/	0~3.2	8.8	12.7~16.9	3.1	7(1)

注:工况中,水库入库径流量高于平水年为偏丰,低于平水年为偏枯;工况栏()内的值为统计年数。

4 结 论

(1) 龙羊峡水库为黄河干流上的多年调节大型水库,蓄水后遇黄河进入连续偏枯水期,仅有个别年份来水较丰,造成水库出现水位变幅较大的年际运行过程,而不同运行过程正是影响水库水温结构演变的根本原因。年内不同时段,水库呈现基本稳定的垂向水温结构,在5~10月,各年份水温分层差异显著,低水位时

内部水温变幅较大,而高水位偏枯的水文条件,水库底部呈现稳定的滞温层,水位是决定年际内部水温和分层形态变化的最主要因素。

(2) 蓄水前后,水库下游河道年内水温变化十分显著,在不同的出入库水量条件下水位水库与下游河道水温呈现不同的线性相关关系。由于龙羊峡水库长期运用水位偏低,未达到设计要求的运行条件,考虑发电和综合用水需求水库将在较高水位运用,从而与前期偏低水位不同,会进一步加强下游河道水温过程的均化和延迟现象。

(3) 在开展对大型多年调节水库的水温规律研究中,必须详细分析水库运行条件与水库水温结构的关系,才能准确判别水库水温结构特征及对下游河道水温的影响程度。

参考文献:

- [1] ELLIOTT J M, HURLEY M A, FRYER R J. A new, improved growth model for brown trout, *Salmo trutta* [J]. *Functional Ecology*, 1995, 9(2): 290-298.
- [2] CAISSE D. The thermal regime of rivers: A review [J]. *Freshwater Biology*, 2006, 51(8): 1389-1406.
- [3] 李冰冻, 李嘉, 李克锋, 等. 二滩水库坝前及下泄水体水温分布现场观测与分析[J]. *水利水电科技进展*, 2009, 29(4): 21-23. (LI Bing-dong, LI Jia, LI Ke-feng, et al. Field observation and analysis of water temperature distribution in front of dam and in outflow in Ertan Reservoir[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2009, 29(4): 21-23. (in Chinese))
- [4] 郭文献, 王鸿翔, 夏自强, 等. 三峡-葛洲坝梯级水库水温影响研究[J]. *水力发电学报*, 2009, 28(6): 182-187. (GUO Wen-xian, WANG Hong-xiang, XIA Zi-qiang, et al. Effects of Three Gorges and Gezhouba reservoirs on river water temperature regimes [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, 28(6): 182-187. (in Chinese))
- [5] 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. (ZHANG Shi-jie, PENG Wen-qi. Water temperature structure and influencing factors in Ertan Reservoir [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(10): 1254-1258. (in Chinese))
- [6] 邓云, 李嘉, 李克锋, 等. 梯级电站水温累积影响研究[J]. *水科学进展*, 2008, 19(12): 273-279. (DENG Yun, LI Jia, LI Ke-feng, et al. Cumulative impact of cascade power stations on water temperature [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(12): 273-279. (in Chinese))
- [7] 郭文献, 夏自强, 王远坤, 等. 三峡水库生态调度目标研究[J]. *水科学进展*, 2009, 20(4): 554-559. (GUO Wen-xian, XIA Zi-qiang, WANG Yuan-kun, et al. Ecological operation goals for Three Gorges Reservoir [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(4): 554-559. (in Chinese))
- [8] NEUMANN D W, ZAGONA 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.
- [9] 邓云, 李嘉, 罗麟, 等. 水库温差异重流模型的研究[J]. *水利学报*, 2003, 34(7): 7-11. (DENG Yun, LI Jia, LUO Lin, et al. Temperature prediction model for reservoirs [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(7): 7-11. (in Chinese))
- [10] 任华堂, 陈永灿, 刘昭伟. 大型水库水温分层数值模拟[J]. *水动力学研究与进展: A辑*, 2007, 22(6): 667-675. (REN Hua-tang, CHEN Yong-can, LIU Zhao-wei. Temperature simulation in large reservoir [J]. *Journal of Hydrodynamics: Ser A*, 2007, 22(6): 667-675. (in Chinese))
- [11] POLITANO M, HAQUE M D M, WEBER L J. A numerical study of the temperature dynamics at McNary Dam [J]. *Ecological Modeling*, 2008, 212: 408-421.
- [12] 冉本银, 艾学山. 龙羊峡水库年末运行水位控制研究[J]. *电网与清洁能源*, 2008, 24(6): 13-15. (RAN Ben-yin, AI Xue-shan. Research on operation water level control of Longyangxia Reservoir at end of year [J]. *Power System and Clean Energy*, 2008, 24(6): 13-15. (in Chinese))

Water temperature dynamics of Longyangxia Reservoir and its influence on downstream water temperature *

SONG Ce, ZHOU Xiao-de, XIN Xiang-wen

(*Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

Abstract: The variation in operating stages could result in a change of water temperature structure of multi-year regulating storage reservoirs. Thus, understanding of the water temperature dynamics would be essential to study the effect on the downstream water temperature. Using the observational data from the Longyangxia reservoir for the period 1988 to 2008, the variation in reservoir temperature profile and the effect of reservoir operation on the downstream water temperature are studied. The data includes operating stages and reservoir and downstream water temperatures. The result shows the variation in reservoir temperature profile and the effect of reservoir operation on the downstream water temperature is closely related to the reservoir operating scheme. From December to next March, the reservoir water temperature is either weakly stratified or uniformly distributed; higher stages can store more heat, and both reservoir water temperature and downstream water temperature change synchronously with reservoir stages. From May to October, the reservoir water structure is stratified; the stratification is mainly controlled by the reservoir stage, and the downstream water temperature is reversely related to reservoir stages. In the months of November and April, the reservoir temperature structure is rather uniform, and serves as turning points. This study provides valuable information for the determination of the temperature dynamics in large reservoirs and its influence on downstream water temperature.

Key words: Yellow River; Longyangxia Reservoir; water temperature; thermal stratification; downstream

论文优先数字出版公告

为即时确认作者科研成果、彰显论文传播利用价值,从2011年起,将在《水科学进展》印刷版期刊出版的定稿论文优先在“中国知网”(http://www.cnki.net)以数字出版方式提前出版(优先数字出版)。欢迎读者在中国知网“中国学术期刊网络出版总库”检索、引用本刊作者最新研究成果。

《水科学进展》编辑部

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No.50579061).