No. 3 Jun. 2020

DOI:10.12170/20200227004

李楠, 曹蕊, 脱友才, 等. 基于卫星遥感图像的丰满水库冰情演变规律研究 [J]. 水利水运工程学报, 2020(3): 19-28. (LI Nan, CAO Rui, TUO Youcai, et al. Research on ice regime evolution of the Fengman Reservoir based on satellite remote sensing images[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(3): 19-28. (in Chinese))

基于卫星遥感图像的丰满水库冰情演变规律研究

李楠1,曹蕊2,脱友才3,邓云3

- (1. 雅砻江流域水电开发有限公司,四川成都610051; 2. 福建省环境保护设计院有限公司,福建福州350003;
- 3. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:基于 ENVI 5.1 软件平台,采用 Landsat-7 和 Landsat-8 卫星遥感图像,对吉林市丰满水库的卫星遥感图像 进行冰情解译和库表温度反演,探究丰满水库的整体冰情演变规律及其与库区水体热力演变的关系。结果表明:在整个冰期,丰满水库入流条件稳定,库区冰情受水体热力学影响显著;在结冰期,库区表层水温呈库中低、坝前和库尾高的分布规律,结冰过程从库区中部开始,逐渐向坝前和库尾发展,坝前最后封冻;在稳封期,库区冰盖下水温呈垂向逆温分布,冰盖厚度沿程分布不均匀,库尾存在 10~30 km 的明流段;在开河期,库区表层水温自库尾至坝前呈沿程降温分布,水库以文开河的形式自库尾向坝前逐渐开河。

关键词:卫星遥感图像;冰情解译;温度反演;水库冰;热力演变

中图分类号: TV697.2 文献标志码: A 文章编号: 1009-640X(2020)03-0019-10

冰情的出现会对水库的运行管理、水资源调度、工程安全、生态环境等造成一系列不利的影响。水库冰情与库区动力和热力条件密切相关,在入流稳定的大型水库中往往表现出显著的热力学特征,即水库冰盖的热力学生消、发展和库区水体的热力演变相互影响^[1]。目前,我国水利水电工程的开发正逐渐向高海拔寒冷的河源区推进,而在此区域修建的水库必然会面临冰情问题。因此,开展寒区水库冰情研究具有重要的科学意义和工程应用价值。

水库冰情研究最直接的手段是原型观测。国外最具有代表性的是前苏联学者于 20 世纪 50 至 80 年代 对其境内 30 多座水库开展的原型观测,并进行了水库冰情的演变规律研究[1]。我国的水库冰情研究始于 20 世纪 80 年代中后期,其中对水库静冰压力与冰温[2-4]、冰物理特性[5-7] 方面的研究较多,且取得了丰富的研究成果。马喜祥等[8] 通过对万家寨水库的现场考察并结合实测冰情资料,对万家寨水库的封开河过程进行了描述。脱友才等[9-11] 对丰满水库坝前冰厚、封开河时间等历史资料进行整理,通过对丰满水库水温冰情的连续观测,初步描述了丰满水库年内水温和冰情变化的基本规律。吕明治等[12] 对十三陵、张河湾、西龙池、蒲石河和呼和浩特 5 座抽水蓄能电站的冰情进行了原型观测,初步分析了水库冰情演变过程。郭红永等[13] 对东北某抽水蓄能电站开展了原型观测,结合上水库运行方式,分析了上水库冰情的形成及动态。赵海镜等[14] 对呼和浩特抽水蓄能电站原型观测资料进行分析,总结了呼和浩特抽水蓄能电站上、下水库及附近哈拉沁水库的冰情形成及消长过程。以上的水库冰情研究均基于传统的定点测量和目视观测,往往受到交通、目视距离、观测角度、天气状况等条件的制约,难以充分获取水库整体冰情演变情况。

冰雪具有较高的反射率,这与除云以外的多数其他自然表面有着明显不同。因此卫星遥感非常适合对冰雪的监测,可以依据其反射和放射特性来进行识别[15],卫星遥感技术的发展为水库冰情研究提供了新的

收稿日期: 2020-02-27

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51309169)

作者简介: 李 楠(1987—), 男, 山西太原人, 工程师, 博士, 主要从事环保水保管理工作。E-mail; linan@ylhdc.com.cn

通信作者: 脱友才(E-mail: tuoyoucai@scu.edu.cn)

手段。本文基于 ENVI 5.1 软件平台,采用 Landsat-7 和 Landsat-8 卫星遥感图像,以吉林市季节性冰封的丰满水库为研究对象,通过对卫星遥感图像的冰情解译和地表温度反演,并结合历史水温冰情资料,探究丰满水库的整体冰情演变规律及其与库区水体热力演变的关系。

1 研究区域

丰满水库位于北温带季风气候区的吉林省吉林市,是第二松花江上的第3个梯级水库,上游依次建有红石和白山梯级水库,下游建有永庆反调节水库(图1)。丰满水库具有多年调节性能,坝址控制流域面积4.25万km²,最大坝高为91.7 m,正常蓄水位263.5 m,相应库容88.50亿m³,死水位242.0 m,调节库容达61.64亿m³。

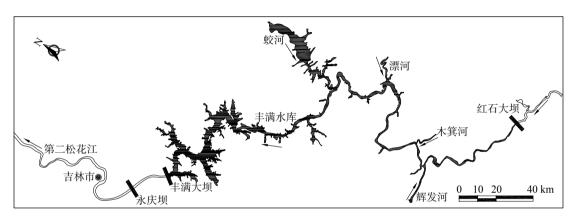


图 1 丰满水库平面示意

Fig. 1 Sketch map of Fengman Reservoir

丰满电厂自 1960 年代起对坝前冰厚和封、开河日期进行了长达 40 余年的观测记录,四川大学自 2011 年起对丰满水库水温冰情进行了观测。基于历史资料和观测数据,脱友才等[9·11] 总结了丰满水库水温冰情变化的基本规律: (1)丰满水库具有典型的季节性冰封水库水温分布特征,即春夏季坝前水温分层显著,冬季坝前水温逆温分布; (2)冬季丰满电站下泄水温稳定在 2.3 ℃ 左右,下泄热流量导致坝址下游 70 km 河道不封冻; (3)丰满水库封河、开河时段分别为 12 月中旬至 1 月中旬和 4 月中旬至 4 月下旬,多年平均历时 133 d; (4)稳封期丰满库区冰厚沿程不均匀分布。

2 研究方法

采用 Landsat-7 ETM+和 Landsat-8 OLI 传感器数据对水库冰情进行解译,采用 Landsat-8 TIRS 传感器数据对水库表层温度进行反演。基于研究目的、排除偶然性、保证周期连续性,在筛选研究区域无云或少云的图像后,选取丰满水库 2011—2012 年结冰期、2012—2013 年结冰期、2014 年开河期和 2016 年开河期的卫星遥感图像进行冰情解译;选取 2013—2014 年冰期及前后的卫星遥感图像进行库表温度反演。

冰情解译的主要步骤为条带修复、波段叠加、RGB 假彩色增强、图像分类和数据提取。Landsat-7 卫星遥感图像在进行单波段图像条带修复后,对 Band 1~Band 5 进行叠加; Landsat-8 卫星遥感图像对 Band 2~Band 6 进行叠加。根据不同波段 RGB 组合对地物增强的效果经验和尝试, Landsat-7 卫星遥感图像采用 Band 4, Band 5, Band 3 的 RGB 假彩色合成方案; Landsat-8 卫星遥感图像采用 Band 5, Band 6, Band 4 的 RGB 假彩色合成方案。之后采用非监督分类法的 ISODATA 分类器进行图像分类,分类结果根据目视解译

以及先验实地调查进行定义并子类合并,最终将水库内的地物识别定义成冰和水。图 2 为冰情解译结果与当日卫星遥感照片对比,结果显示二者吻合良好。

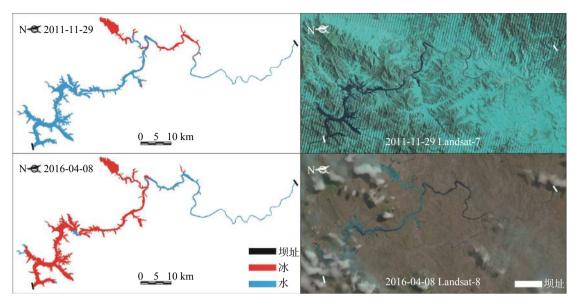


图 2 冰情解译结果与当日卫星遥感照片对比

Fig. 2 Comparisons of ice interpretation results and satellite images of Fengman Reservoir

基于辐射传输方程法的 TIRS 地表温度反演主要步骤为辐射定标、大气校正、地表比辐射率计算、黑体辐射亮度计算和地表温度计算。采用 ENVI 5.1 软件的辐射定标工具,自动读取元数据文件中的增益以及补偿数据,对多光谱和热红外数据依次进行辐射定标;采用 FLAASH Atmospheric Correction 工具,根据丰满地区纬度和卫星遥感图像拍摄时间选择合适的 MODTRAN 大气模型参数。为获取较精确的地表比辐射率数据,采用覃志豪等[16] 提出的地表比辐射率计算方法,将地表分成水体、自然表面和城镇区,分别对这 3 种地表类型计算地表比辐射率。在完成黑体辐射亮度计算和地表温度计算后,将反演结果与实测水温进行对比,以验证该方法的反演精度。结果(表 1)显示:反演水温在升温期(降温期)均略高于(低于)实测水温;反演水温与实测水温基本相近,绝对误差在 0.4~2.4 ℃,反演效果较为理想。

表 1 库表实测水温与反演水温对比

			l retrieval results	

验证区域	验证日期	所处时期	实测水温/℃	反演水温/℃	绝对误差/℃
	2014-04-19	升温期	3.8	4.2	0.4
丰满坝前区域	2014-10-28	降温期	12.9	10.5	2.4
干俩项刖亾哦	2015-04-22	升温期	3.6	4.5	0.9
	2015-10-31	降温期	11.1	9.6	1.5
	2014-04-19	升温期	4.8	6.2	1.4
永庆坝下区域	2014-10-28	降温期	11.6	9.4	2.2
水庆坝下区域	2015-04-22	升温期	5.2	7.2	2.0
	2015-10-31	降温期	9.8	8.1	1.7

3 冰情演变分析

3.1 库区结冰过程

2011—2012 年、2012—2013 年丰满水库结冰期冰情解译结果分别如图 3 和图 4 所示,表 2 为丰满水库结冰期冰覆盖面积统计。丰满水库历史封河时段为 12 月中旬至 1 月中旬,从获得的最早冰情出现和最早完全封冻图像并结合历史冰情数据可以推断,2011—2012 年的初冰时间为 11 月下旬,完全封冻时间为 12 月下旬,结冰期历时约 1 个月;2012—2013 年的初冰时间为 11 月下旬,完全封冻时间为 12 月下旬至 1 月上旬,结冰期历时 1.0 至 1.5 个月。解译和统计结果表明:丰满水库结冰过程以热力结冰为主,无显著的流冰出现;主库中段(距坝前 72~90 km 区域)首先封冻,之后结冰区域分别向坝前和库尾发展;蛟河支库和主库库尾结冰较早,坝前最后封冻;这种结冰规律,与多钦科□所总结的第三类水库结冰顺序—致,其产生原因主要来自上游梯级电站泄水影响;稳封期冰覆盖率超过 97.0%,除库尾外均处于封冻状态,无清沟或开敞水域;库尾段由于受上游红石电站冬季下泄高温水(2.5 ℃ 左右)影响,在结冰后期存在 10~20 km 的明流段。

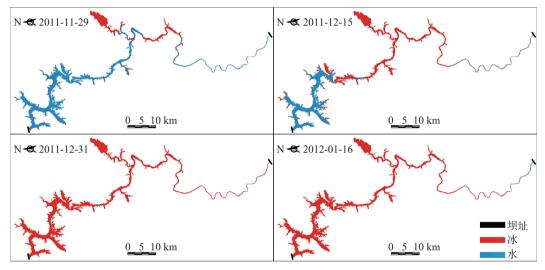


图 3 2011-2012 年丰满水库结冰期冰情解译结果

Fig. 3 Ice interpretation results of Fengman Reservoir during the freeze-up period of 2011-2012

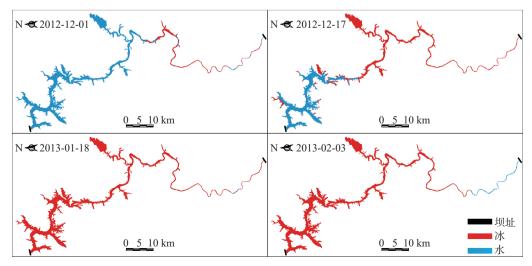


图 4 2012-2013 年丰满水库结冰期冰情解译结果

Fig. 4 Ice interpretation results of Fengman Reservoir during the freeze-up period of 2012-2013

Tab. 2 Statistics of ice coverage rate of Fengman Reservoir during the freeze	

结冰期时段	日期	冰覆盖面积/km²	水面积/km²	冰覆盖率/%	已封冻区域
	2011-11-29	44.037	154.111	22.22	库中段、蛟河支库
2011-2012年	2011-12-15	100.639	97.511	50.79	库中段、蛟河支库
2011—2012—	2011-12-31	196.558	1.591	99.20	全库区
	2012-01-16	195.732	2.417	98.78	全库区、库尾有明流段
	2012-12-01	22.277	175.876	11.24	库中段
2012-2013年	2012-12-17	97.120	101.031	49.01	库中段、库尾段、蛟河支库
2012—2013—	2013-01-18	197.248	0.904	99.54	全库区
	2013-02-03	192.442	5.771	97.09	全库区、库尾有明流段

表 3 为丰满水库结冰期断面岸冰宽度统计,结果表明: 坝前区域岸冰较宽但所占断面宽度的比例较小; 库尾段岸冰较窄但所占断面宽度的比例较大;结冰期间岸冰会有一定程度的发展。冰情解译结果也表明, 丰满水库断面封冻不是由岸冰增长、合拢导致的,而是岸冰和主流水域结冰同时发生、相互连接形成的断面封冻。

表 3 丰满水库结冰期断面岸冰宽度统计

Tab. 3 Statistics of border ice width of Fengman Reservoir during the freeze-up period

				* *
	断面距	断面	岸冰	岸冰占断面
日期	坝址位置/km	宽度/m	宽度/m	宽度比例/%
	5	1 147	84	7.32
2011-11-29	45	571	30	5.25
	140	180	30	16.67
	5	1 147	127	11.07
2011-12-15	45	571	60	10.51
	140	180	30	16.67
	5	1 147	42	3.66
2012-12-01	45	571	30	5.25
	140	180	30	16.67
	5	1 147	85	7.41
2012-12-17	45	571	120	21.02
	140	180	断面封冻	断面封冻

3.2 库区开河过程

2014年、2016年丰满水库开河期冰情解译结果分别如图 5 和图 6 所示,表 4 为丰满水库开河期冰覆盖面积统计。随着春季气温、太阳辐射以及入流水温的升高,丰满水库进入开河期,3 月下旬库区冰覆盖率依然维持在 90% 左右,最早的解冻图像日期为 4 月中旬。根据苏联水库解冻资料统计,水库不同区域上冰的消融需要持续 5~20 d^[1],而丰满水库历史开河时段为 4 月中旬至 4 月下旬,若将 3 月中旬作为开河期的起始,则丰满水库的开河历时约 1 个月。解译和统计结果表明:丰满水库在稳封期库尾就存在明流段,该段在上游红石电站下泄影响下流速和水位变动均较大且水温较高,因此开河期明流段逐渐扩大并向库区中段方向推移;蛟河支库的开河时段为 3 月下旬至 4 月上旬;丰满库中段开河逐渐向坝前方向进行,部分区域会出现分段开河的现象,并随着气象条件的逐渐升高而扩大和发展。总体来看,丰满水库开河过程从库尾段开始,并不断发展到库区中段和坝前,开河期冰盖的热力融化过程显著,库尾段无冰坝出现,表现为文开河。

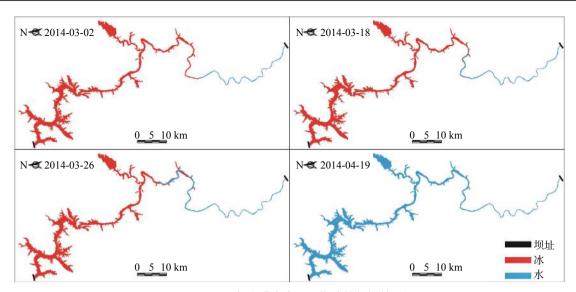


图 5 2014 年丰满水库开河期冰情解译结果

Fig. 5 Ice interpretation results of Fengman Reservoir during the break-up period of 2014

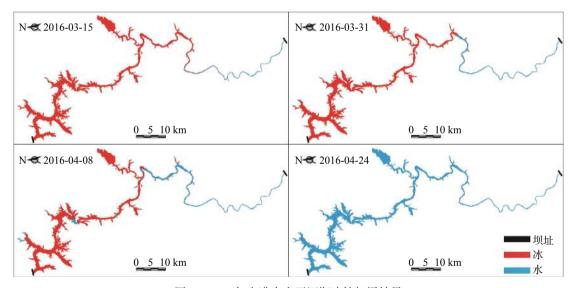


图 6 2016 年丰满水库开河期冰情解译结果

Fig. 6 Ice interpretation results of Fengman Reservoir during the break-up period of 2016

表 4 丰满水库开河期冰覆盖面积统计

Tab. 4 Statistics of ice coverage rate of Fengman Reservoir during the break-up period

		<u> </u>		1 1
日期	冰覆盖面积/km²	水面积/km²	冰覆盖率/%	已开河区域
2014-03-02	188.872	9.292	95.31	库尾段
2014-03-18	183.630	14.530	92.67	库尾段、库中段
2014-03-26	176.576	21.642	89.08	库尾段、库中段
2014-04-19	0	198.161	0	全库区
2016-03-15	188.647	9.608	95.15	库尾段
2016-03-31	180.972	17.181	91.33	库尾段、库中段
2016-04-08	161.876	36.287	81.69	库尾段、库中段、坝前局部区域
2016-04-24	0	198.161	0	全库区

4 水库热力演变与冰情的关系

4.1 结冰期库区热力与冰情关系

2013 年丰满水库表层温度反演结果与当日卫星遥感照片如图 7 所示。2013 年 10 月 9 日处于降温期,库区尚未结冰,库表水温反演结果显示: 坝前水温为 15.0~16.0 $\,^\circ$ 、蛟河支库水温为 14.0~15.0 $\,^\circ$ 、从距坝址 80 km 处起,水温降至 13.0 $\,^\circ$ 、当日入库日均水温为 15.4 $\,^\circ$ 、入库水体从库尾向库中流进的过程中逐渐失热,在库区中上游区域下降至最低,该区域也是每年库区最早开始结冰的区域。12 月 28 日处于结冰期,库区大部分区域已结冰,库表温度反演结果显示: 坝前未封冻区域库表水温为 0~2.0 $\,^\circ$ 、库区表层冰温为 $\,^\circ$ -25.0~10.0 $\,^\circ$ 、由于结冰期表层冰温与冰厚正相关,而库区中上游段的表层冰温最低,可以推断此处冰盖最厚,该区域也是结冰期前水温最低且结冰期最早结冰的区域,当日入库日均水温为 2.3 $\,^\circ$ 、使得库尾段水温高于 0 $\,^\circ$ 。

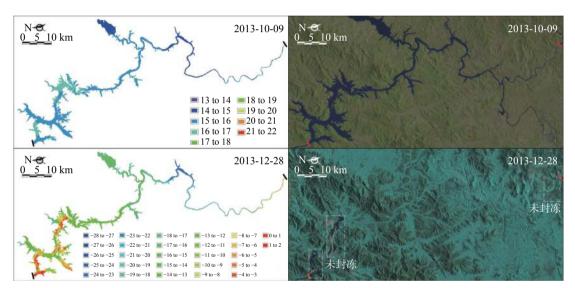


图 7 2013 年丰满水库表层温度反演结果与当日卫星遥感照片(单位: ℃)

Fig. 7 Surface temperature retrieval results and satellite images of Fengman Reservoir of 2013 (unit: °C)

在结冰期前,丰满水库的库表热力分布规律为自坝前至库区中上游区域水温沿程降温,库尾段则由于较高温的入流而水温偏高。结冰期前的库表热力分布直接影响了其结冰顺序,导致出现库区中上游区域和蛟河支库首先结冰、坝前最后结冰、库尾段不完全封冻的结冰规律。

4.2 稳封期库区热力与冰情关系

2014年2月23日丰满水库立面二维水温与冰盖分布如图8所示,图中散点为垂线水温实测点。2月23日处于稳封期,当日入库日均水温为1.7℃,库尾明流段长度约33km,其垂向水温基本同温,沿程降温率为0.12℃/km;库区其余水域全部封冻,除坝前区域外冰下水温(冰盖下1~2m)较库尾段下降了约1.0℃;冰盖下各测量断面的垂向水温呈现逆温分布结构,且自库尾至坝前逆温分布结构逐渐明显;2#~5#测量断面的表层与库底垂向温差分别为0.2,2.7,2.0和3.1℃;库区冰盖沿程分布不均匀,库区中上游区域最先结冰,其冰厚最大(3#断面,平均冰厚77cm),坝前最后封冻,其冰厚较小(5#断面,平均冰厚59cm)。

稳封期丰满库区垂向水温主要呈现逆温分布结构, 坝前水深且蓄热能力强, 其垂向水温温差较大; 库尾段水浅且具有一定流速, 其垂向水温为同温分布; 库区冰下水温自库尾至坝前表现沿程降温的趋势, 随着坝前高温水体的下泄和库区低温水体的流动, 坝前区域水温会逐渐降低, 库区整体热量也会进一步减小; 库区冰盖沿程分布不均匀, 其厚度分布与结冰期封冻先后顺序正相关。

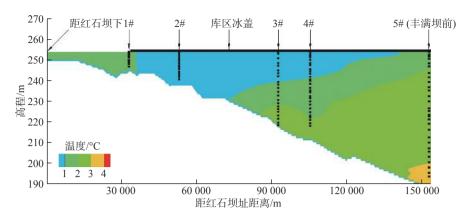


图 8 2014年2月23日丰满水库立面二维水温与冰盖分布

Fig. 8 2D vertical water temperature and ice cover distributions of Fengman Reservoir on Feb. 23, 2014

4.3 开河期库区热力与冰情关系

2014年丰满水库表层温度反演结果与当日卫星遥感照片如图 9 所示。3 月 2 日处于稳封末期,库尾明流段长度约 44 km,库区表层温度反演结果显示: 坝前至库中的表层冰温为 $-7.0\sim0$ ℃,较 2013年 12 月 28 日的表层冰温有所上升,可以推断此时库区冰盖厚度已经减小; 坝前表层冰温最低,为 $-7.0\sim-6.0$ ℃,而库尾开河段水温偏高,当日入库日均水温为 2.5 ℃。2014年 4 月 19 日库区已经全部开河,库区表层水温反演结果显示: 库区坝前水温为 4.0~5.0 ℃; 蛟河支库水浅,水体升温较快,水温为 7.0~10.0 ℃; 当日入库日均水温为 6.3 ℃,表层水温自库尾至坝前沿程降温。

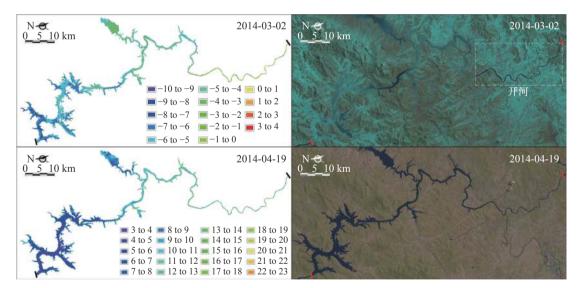


图 9 2014 年丰满水库表层温度反演结果与当日卫星遥照片(单位: ℃)

Fig. 9 Surface temperature retrieval results and satellite images of Fengman Reservoir of 2014 (unit: °C)

开河初期库区水温分布自库尾至坝前沿程降低,并出现表层浮力流动现象¹¹¹,随着时间的推移,冰下水温沿程分布降低的趋势更加明显,在这样的热力状况的影响下,丰满水库解冻过程从库尾开始,并不断发展到库区中段和坝前。

5 结 语

丰满水库是寒区大型季节性冰封水库,上游梯级电站的修建,使得整个冰期丰满水库入流条件稳定,库

区冰情受水体热力学影响显著。本文基于 ENVI 5.1 软件平台,对丰满水库冰期及前后的 Landsat 系列卫星 遥感图像进行了冰情解译和库表温度反演;结合解译成果和历史水温冰情资料,探究了丰满水库整体冰情 演变规律及其与库区水体热力演变的关系,得出以下结论:

- (1)在封冻期前,丰满水库坝前区域水深且蓄热量大,入库低温水替换至水库中部,表层水温自坝前至库区中上游区域呈沿程降温分布,库尾段则由于较高温的入流而水温偏高。
- (2)在结冰期,丰满库表水温呈库区中低、坝前和库尾高的分布,在此影响下,丰满水库结冰过程从库区中段开始,逐渐向坝前和库尾发展,坝前最后封冻。
- (3)在稳封期,丰满水库冰盖下水温呈垂向逆温分布,坝前至库区中段均处于封冻状态,冰盖厚度沿程不均匀分布.库尾存在约 10~30 km 的明流段。
- (4)在开河期,丰满水库整体蓄热降低,入库水温较高,受表层浮力流动现象和冰水热交换影响,库表水温自库尾至坝前呈沿程降温分布,由于库尾稳定的入流条件,水库以文开河的形式自库尾向坝前逐渐开河。

掌握不同类型水库整体和细节冰情演变规律是水库冰情研究的基础工作,可为数学模型开发和验证提供重要依据。本文对 Landsat 系列卫星遥感图像的解译、反演方法以及对丰满水库整体冰情演变规律的分析,可为今后寒区水库冰情研究提供思路和参考。

参考文献:

- [1] 多钦科. 苏联河流冰情[M]. 张瑞芳, 译. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. (DONCHENKO P B. River ice conditions in the U.S.S.R[M]. Translated by ZHANG Ruifang. Beijing: China Science and Technology Publisher, 1991. (in Chinese))
- [2] 苏绍民, 丁代膺, 周永学, 等. 平原水库冰温和冰压力观测 [J]. 内蒙古水利, 2002(2): 84-86. (SU Shaomin, DING Daiying, ZHOU Yongxue, et al. Observation of ice temperature and pressure in reservoir of plain region [J]. Inner Mongolia Water Resources, 2002(2): 84-86. (in Chinese))
- [3] 黄文峰, 李志军, 贾青, 等. 水库冰表层形变的现场观测与分析[J]. 水利学报, 2016, 47(12): 1585-1592. (HUANG Wenfeng, LI Zhijun, JIA Qing, et al. Field observations and analysis of surface displacement of ice cover on reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(12): 1585-1592. (in Chinese))
- [4] 卢志明, 李志军, 于贺海, 等. 石佛寺水库和乌梁素海冰温剖面类型的统计分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2019, 2(5): 10-15. (LU Zhiming, LI Zhijun, YU Hehai, et al. Statistical analysis of the ice temperature profile types of reservoirs and lakes in Northern China[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2019, 2(5): 10-15. (in Chinese))
- [5] 李志军, 贾青, 黄文峰, 等. 水库淡水冰的晶体和气泡及密度特征分析[J]. 水利学报, 2009, 40(11): 1333-1338. (LI Zhijun, JIA Qing, HUANG Wenfeng, et al. Characteristics of ice crystals air bubbles and densities of fresh ice in a reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(11): 1333-1338. (in Chinese))
- [6] 李志军, 杨宇, 彭旭明, 等. 黑龙江红旗泡水库冰生长过程现场观测数据的剖析[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(3): 270-274. (LI Zhijun, YANG Yu, PENG Xuming, et al. The analysis of the field observation data of fresh ice growing process in Hongqipao reservoir of Heilongjiang [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(3): 270-274. (in Chinese))
- [7] 王国志, 黄文峰, 李志军, 等. 大庆红旗泡水库冰内部组构观测方法[J]. 黑龙江水专学报, 2009, 36(4): 75-78. (WANG Guozhi, HUANG Wenfeng, LI Zhijun, et al. Observations on the inner structures of Hongqi-pao reservoir ice in Daqing[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering, 2009, 36(4): 75-78. (in Chinese))
- [8] 马喜祥, 熊运阜, 徐伟, 等. 万家寨水库冰情浅议[J]. 泥沙研究, 2003(4): 66-72. (MA Xixiang, XIONG Yunfu, XU Wei, et al. Ice regime in Wanjiazhai reservoir[J]. Journal of Sediment Research, 2003(4): 66-72. (in Chinese))
- [9] TUO Y C, LI J, DENG Y, et al. The evolution and analysis of ice regime in front of the dam of Fengman reservoir[C]// Proceedings of 21st International Association of Hydraulic Research International Symposium on Ice. Dalian, 2012: 128-138.
- [10] TUO Y C, DENG Y, LI J, et al. Water temperature and ice conditions in Fengman Reservoir, winter of 2012-2013[C]// Proceedings of 22th International Association of Hydraulic Research International Symposium on Ice. Singapore, 2014: 434-441.

- [11] 脱友才, 刘志国, 邓云, 等. 丰满水库水温的原型观测及分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 731-738. (TUO Youcai, LIU Zhiguo, DENG Yun, et al. Water temperature of the Fengman reservoir with seasonal ice cover[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 731-738. (in Chinese))
- [12] 吕明治, 赵海镜, 靳亚东, 等. 典型抽水蓄能电站水库冰情原型监测[C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会. 抽水蓄能电站工程建设文集. 北京: 中国电力出版社, 2014: 71-76. (LÜ Mingzhi, ZHAO Haijing, JIN Yadong, et al. Observation of reservoir ice regime in a typical pumped storage power station[C]//Power Grid Peak Load Regulation and Pumped Storage Committee of China Society for Hydropower Engineering. Proceedings of the Construction of Pumped Storage Power Station. Beijing: China Electric Power Press, 2014: 71-76.(in Chinese))
- [13] 郭红永, 高玺炜, 于思雨, 等. 抽水蓄能电站上水库冰情及应对措施[C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会. 抽水蓄能电站工程建设文集. 北京: 中国电力出版社, 2016: 101-104. (GUO Hongyong, GAO Xiwei, YU Siyu, et al. Ice regime and solutions of pumped storage power station[C]//Power Grid Peak Load Regulation and Pumped Storage Committee of China Society for Hydropower Engineering. Proceedings of the Construction of Pumped Storage Power Station. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 101-104. (in Chinese))
- [14] 赵海镜, 刘静, 刘凤成. 呼和浩特抽水蓄能电站水库冰情研究[C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会. 抽水蓄能电站工程建设文集. 北京: 中国电力出版社, 2016: 130-133. (ZHAO Haijing, LIU Jing, LIU Fengcheng. Study of ice regime in Hohhot pumped storage power station[C]//Power Grid Peak Load Regulation and Pumped Storage Committee of China Society for Hydropower Engineering. Proceedings of the Construction of Pumped Storage Power Station. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 130-133. (in Chinese))
- [15] 刘玉洁, 杨忠东. MODIS遥感信息处理原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (LIU Yujie, YANG Zhongdong. Principles and algorithms of MODIS remote sensing information processing [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [16] 覃志豪, 李文娟, 徐斌, 等. 陆地卫星TM6波段范围内地表比辐射率的估计[J]. 国土资源遥感, 2004, 16(3): 28-32, 36, 41. (QIN Zhihao, LI Wenjuan, XU Bin, et al. The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2004, 16(3): 28-32, 36, 41. (in Chinese))

Research on ice regime evolution of the Fengman Reservoir based on satellite remote sensing images

LI Nan¹, CAO Rui², TUO Youcai³, DENG Yun³

(1. Yalong River Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu 610051, China; 2. Fujian Environmental Protection Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350003, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Based on the ENVI 5.1 software platform and by using the Landsat-7 and Landsat-8 satellite remote sensing images, ice regime interpretation and surface temperature retrieval were performed for the Fengman Reservoir, which is located in Jilin City. Afterwards, the patterns of the overall ice regime evolutions and their relations with thermal variations of the Fengman Reservoir were investigated. The results indicated that: during the whole ice season, the ice regime was significantly influenced by the water thermodynamics of the Fengman Reservoir due to the steady inflow conditions; in the freeze-up period, the reservoir surface water temperatures showed a pattern, with the temperature lower in the middle area of the reservoir, higher in the area in front of the dam and the end area of the reservoir, the freeze-up started from the middle area of the reservoir and expanded to the area in front of the dam and the end area of the reservoir, and the area in front of the dam froze up at last; in the steady freeze-up period, vertical water temperature of the reservoir was inversely distributed underlying the ice cove, ice thickness was unevenly distributed along the reservoir, and an open water flow of 10 km to 30 km existed in the end area of the reservoir; in the break-up period, the surface water temperatures declined from the area in front of the dam to the end area of the reservoir, and the thawing started from the end area of the reservoir to the area in front of the dam in the form of over-mature break-up.

Key words: satellite remote sensing image; ice interpretation; temperature retrieval; reservoir ice; thermal evolution