

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0146

梁斯琦, 陆颖, 杨福平, 等. 澜沧江小湾水电站坝前水温垂向分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 156-162. LIANG S Q, LU Y, YANG F P, et al. Vertical distribution characteristics of water temperature in front of Xiaowan hydropower plant on Lancang River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 156-162. (in Chinese)

## 澜沧江小湾水电站坝前水温垂向分布特征

梁斯琦<sup>1</sup>, 陆颖<sup>1,2</sup>, 杨福平<sup>3</sup>, 赵著燕<sup>1</sup>, 肖复晋<sup>1</sup>, 蒋永健<sup>1</sup>

(1. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500; 2. 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 昆明 650091; 3. 华能澜沧江水电股份有限公司, 昆明 650214)

**摘要:** 水温是水生态系统中关键的环境因子, 对水生生物的生存繁殖和水环境系统生态平衡具有重要作用。大型水库建成蓄水后改变原有河道水温结构, 垂向上会出现水温分层现象。以澜沧江小湾水电站为研究对象, 获取坝前1~200 m水深不间断高密度水温数据, 开展小湾水电站坝前垂向水温分布特征研究。结果表明: 小湾水库为典型分层型水库, 坝前水温存在全年分层现象, 夏季分层现象最明显, 冬季分层现象最弱; 表底层水温年平均温差达8.14℃, 水温相对水深年变化率为0.05℃/m; 坝前表层水温与气温呈正相关关系, 水温最值出现时间较气温滞后; 温跃层厚度变化趋势与深度相反, 温跃层深度随季节发生变化, 春季温跃层深度下降, 冬季上升, 夏秋两季处于稳定状态。

**关键词:** 小湾水电站; 垂向分布; 温跃层; 澜沧江; 水温

中图分类号: TV697 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Vertical distribution characteristics of water temperature in front of Xiaowan hydropower plant on Lancang River

LIANG Siqu<sup>1</sup>, LU Ying<sup>1,2</sup>, YANG Fuping<sup>3</sup>, ZHAO Zhuyan<sup>1</sup>, XIAO Fujin<sup>1</sup>, JIANG Yongjian<sup>1</sup>

(1. Institute of International River and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China;

2. Yunnan Provincial Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Ecological Security,

Kunming 650091, China; 3. Huaneng Lancang River Hydropower Inc, Kunming 650214, China)

**Abstract:** Water temperature is a key environmental factor in the aquatic ecosystem, and it plays an important role in the survival and reproduction of aquatic organisms as well as the ecological balance of the aquatic environmental system. The building of large reservoirs will change the original water temperature structure of the river, and the water temperature stratification will appear in the vertical direction. Due to the limitation of observation conditions and methods, the stratified observation of water temperature in reservoirs with water depth over 200 m is seldom carried out both in China and overseas. In this study, Xiaowan hydropower plant on Lancang River was taken as research object, and the uninterrupted high-density water temperature data of 1-200 m depth in front of the dam was obtained to examine the vertical water temperature distribution characteristics in front of the dam of Xiaowan hydropower plant. The results showed that Xiaowan reservoir was a typical stratified reservoir with annual water temperature stratification in front of the dam, which appeared most obvious in summer and most subtly in winter. The annual average temperature difference of surface and bottom water was 8.14℃ and the annual change rate of water temperature relative to water depth was 0.04℃/m. There was a positive correlation between surface water temperature and air temperature

收稿日期: 2019-03-30 修回日期: 2019-09-26 网络出版时间: 2019-10-08

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191008.1400.006.html>

基金项目: 云南省自然科学研究重点项目(2017FA021); 国家重点研发计划(2016YFA0601601)

作者简介: 梁斯琦(1995—), 女, 陕西宝鸡人, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: liangsq11@163.com

通信作者: 陆颖(1978—), 男, 云南昆明人, 副研究员, 博士, 主要从事水文生态学研究。E-mail: yinglu@ynu.edu.cn

in front of the dam, and the maximum water temperature appeared lags behind the air temperature. The changing trend of thermocline thickness was opposite to the depth and the depth of thermocline decreased in spring, increased in winter while remained stable in summer and autumn, respectively.

**Key words:** Xiaowan hydropower plant; vertical distribution; the thermocline; Lancang River; water temperature

水温作为水环境中的重要因素与水体中几乎所有生物和化学过程相关,水温结构变化对河流生态系统,水生生物的生长繁殖及农业灌溉等均会产生重要影响<sup>[1-4]</sup>。大型水库建成后改变河流水文、水力学性质,天然河道“湖库化”,径流、水深、水面面积等均发生巨大变化。库区水流速度减缓,水深增大,原有水温结构随之发生改变,一般会在垂向上出现周期性水温分层现象<sup>[5-7]</sup>。典型分层型水库的垂向水温层分为上、中、下三层,即温变层(表温层),温跃层和滞温层<sup>[8]</sup>。温变层分布于水库表层,水温受太阳辐射和风的作用比较明显;温跃层是指水体垂向温度梯度发生突变或不连续剧变的水层,体现了从一个相对稳定的深层区域(滞温层)到上层混合区域(表温层)的温度急剧变化过程,温跃层的形成改变了上下层水体之间的物质和能量流动<sup>[9-10]</sup>。水库的深水区(滞温层)位于水库底部,受外界影响较小,水温保持稳定且在层内比较均匀<sup>[11-12]</sup>。水库水温的垂向规律与季节有关,并受库型、水库调度影响<sup>[13]</sup>。

目前国内水库水温分层方面的研究成果已较为丰富。如杜林霞等<sup>[14]</sup>分析了三峡水库蓄水以来连续多年的水温梯度实测数据之后发现三峡水库为弱分层型水库,整个水库坝前段水温分层相对明显,但水温分层现象不稳定;李忠顺等<sup>[15]</sup>建立了垂向一维水温模型分析密云水库水温分布规律,模拟结果表明密云水库存在季节性水温分层,分层从春夏之交持续到秋季。李冰冻等<sup>[16]</sup>对雅砻江干流二滩水库坝前水温进行全年观测分析,结果表明二滩水库坝前水体全年保持有温度分层状态,夏季表层与底层温差较大,冬季温差较小。水温分层现象不仅影响库区水质安全与下游河道生态平衡,还对电站的安全稳定运行产生重要影响,因此水库水温分层的相关研究对水库运行管理,河流生态保护具有重要意义。

然而现阶段国内对于特大型水库坝前垂向超深水温的分布研究较少。小湾水库位于澜沧江中游,属于特大型水库,坝前水深超过 200 m。本文以小湾水库为研究对象,对实测获得的坝前垂向水温数据进行统计分析,基于坝前垂向水温数据,从时间尺度上探讨和分析小湾水库坝前水温在垂向上以及水

库温跃层特征向量的变化情况。

## 1 研究区概况及水温测试

### 1.1 研究区概况

小湾水电站位于云南省西部南涧县与凤庆县交界的澜沧江中游河段(图 1),建成时水库坝高位居世界第二,系澜沧江中下游河段规划八个梯级中的第二级,蓄水式水坝,具有多年调节能力。水库坝高 294 m,最大水头 250 m,正常蓄水位海拔为 1 240 m,死水位为 1 166 m,水库面积为 189.10 km<sup>2</sup>,总库容 1 530 km<sup>3</sup>,有效库容 1 130 km<sup>3</sup>,年平均流量为 1 220 m<sup>3</sup>/s,平均径流量 384.7 × 10<sup>8</sup> m<sup>2</sup>,天然最枯流量 273 m<sup>3</sup>/s。小湾库区包括 2 个库区,即澜沧江干流库区和支流黑惠江库区。小湾水库地区属于低纬度高海拔温带亚热带季风气候区,全年日照充足,雨量充沛,干湿季节分明,年平均气温在 14.3 ~ 19.0 °C,多年平均日照时数为 2 130 h,年降水量在 770 ~ 1 330 mm,相对湿度在 63% 至 85%。夏秋季降雨丰富,冬春季降雨减少,日照时间长,雨季一般出现在 5 至 10 月,旱季出现在 11 月至次年 4 月<sup>[17-18]</sup>。



图 1 小湾水电站位置示意图

Fig. 1 Schematic map of Xiaowan hydropower plant

## 1.2 水温测试

本研究以小湾水库坝前 200 m 深水温时空分布特征为研究内容,在坝前布设垂向水温观测仪器,获取长时间序列、连续高密度水温数据。在坝前位置,参考地形图初选范围,而后利用声纳测深仪获得坝前水下断面,测得最深点。在水面浮动平台采用德国产 UIT 水温定制监测设备,以由密至稀从表层向底层进行布设,设备底部辅以配重,以抵消水流阻力对设备产生的位置偏移,坝前垂向水温链布设方法见图 2。考虑表层水体可能受光照等因素影响吸热快升温快而底层水体由于水的透光性差传热慢故变化幅度较小,因此对表层水温数据采集密度较高,随水深增大水温数据采集密度减小<sup>[19]</sup>。自上而下共串联 20 个探头(编号 T01 至 T20),测量水深范围为 1~200 m,每个探头对应的水深见表 1。本次有效数据范围从 2016 年 8 月至 2017 年 6 月,采样频率为 30 min。



图 2 小湾水电站坝前水温链布设方法

Fig. 2 Schematic diagram of water temperature chain layout method in front of Xiaowan hydropower plant

表 1 探头及对应水深

Tab. 1 Probe and corresponding water depth

探头编号	水深/m	探头编号	水深/m
T01	1	T11	30
T02	3	T12	35
T03	5	T13	40
T04	7	T14	45
T05	9	T15	50
T06	11	T16	60
T07	15	T17	80
T08	18	T18	120
T09	21	T19	160
T10	25	T20	200

## 2 结果分析

不同时期气温、日照强度、降雨量等气象因素影响水库水温变化规律,水温的周期性变化主要取决

于周期内热量收支各要素间的平衡<sup>[20-22]</sup>。本文通过分析小湾水库坝前实测垂向水温数据,从不同时间尺度和温跃层特征分析水温在垂向上的变化情况。

### 2.1 水温垂向分布一月变化特征

小湾水库为超深型水库,水流缓慢,水温受到周期性气候变化及热力交换等因素的影响。水温观测结果(图 3)显示:2016 年 8—10 月和 2017 年 5—6 月坝前水温变化幅度较大。该时间段库区气温较高,库表水温吸收大量热量后温度升高,表层水体密度减小,与深层水体对流作用减弱,深层水吸热少升温较慢且水温变幅不大,库底几乎不受太阳辐射,水温一直保持稳定状态。该时间段内水温分层现象较明显,8 月分层现象最显著。2016 年 11 月至次年 4 月库区气温低,太阳辐射弱。表层水温受气温影响持续下降,水体密度增大后下沉与深层水体混合,使坝前水温基本呈稳定状态。该时间段内水温分层迹象不明显,4 月开始气温回升后分层现象逐渐明显。

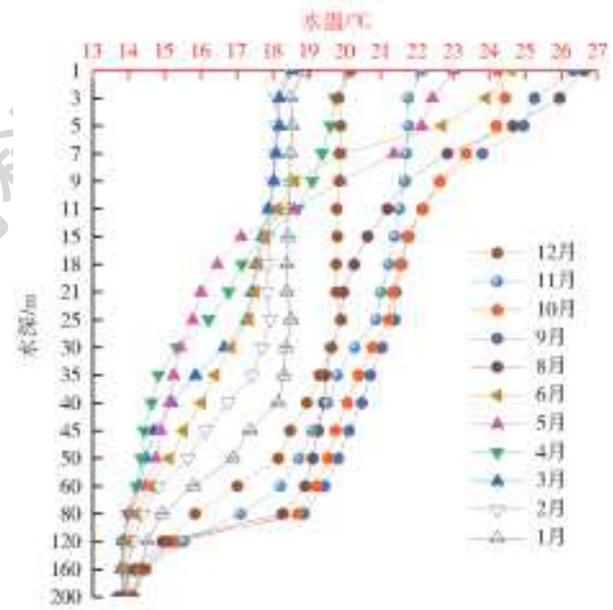


图 3 各月平均水温观测结果

Fig. 3 Monthly mean water temperature observations

小湾水库表层 1 m 月平均水温年内变幅最大,底层 160~200 m 水温全年趋于稳定。观测时段内库表至库底垂向月平均水温最大值差出现在 8 月为 12.96 °C,最小值出现在 2 月为 4.45 °C。由于水温在水深 1~160 m 范围内变化较剧烈,采用每月 15 号作为代表日计算了水温相对水深的变化率。其计算公式为: $R=(T-t)/d$ ( $R$  为水温相对水深变化率, $T$  为表层水温, $t$  为底层水温, $d$  为水深)。计算结果显示(图 4):2016 年 10 月至次年 1 月由于受气温下降影响,表底层水温差减小较快,水温相对水深变化率降低;2017 年 1—3 月气温下降到最低,库表

水温也下降到最低,底层水温全年保持恒稳,故在该时间段内随着水深增加水温下降并不明显;2017年3—6月气温回升较快,太阳辐射增强,表底层水温差开始增大,因而水温相对水深变化率也逐渐增大;2016年8月—2017年6月水温相对水深变化率呈现出先减小再稳定随后增大的趋势,8月达到峰值约为 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,随后开始下降,最小值出现在2月约为 $0.026\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。经计算水温相对水深年变化率为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

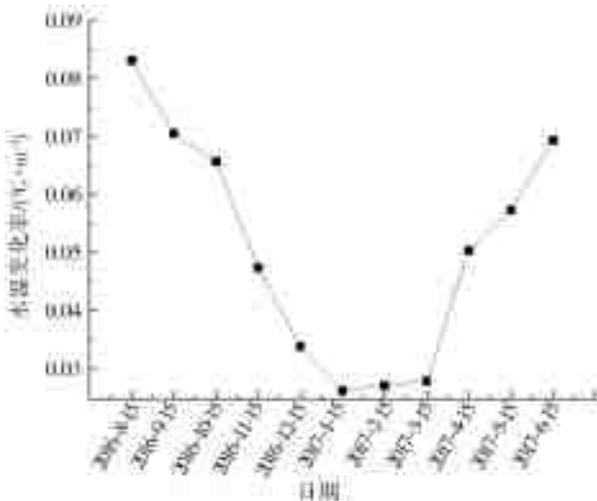


图4 水温相对水深变化率

Fig. 4 Change rate of water temperature relative to water depth

## 2.2 水温垂向分布—季节变化特征

水温季节性变化会对库区水生生物群落结构和生态系统生产力产生重要影响<sup>[23-24]</sup>。由于2017年7月垂向水温数据缺失,故用2016年8月和2017年6月实测水温数据绘制夏季水温结果,小湾水电站坝前垂向水温四季变化结果,见图5。

春季气温与短波辐射值均增加,库表水温升高,水温梯度增大,开始出现较明显的分层现象。受太阳辐射、风及蒸发等气象要素和上游电站调度运行影响,水库上层水体形成温变层,上游低温水下泄后下沉加速了温跃层形成。春季温变层大致出现在表层至水深15 m处,温跃层出现在水深15~160 m。夏季库表水温升高迅速,下层水体通过上层水体的热传导升温故升温较慢,且小湾水库坝前水体深度大,深层水对垂向热量的输送反应滞后,夏季出现表底层水温差全年最大值,因此夏季为全年水温变化幅度最大的季节。同时表层水体不断吸收热量升高温度,水体密度减小不易下沉与深层水体混合,夏季水温分层现象最稳定。夏季大致从表层至水深3 m处出现温变层,温跃层出现在水深3~160 m。秋季气温开始下降,上下层水体温差逐渐减小,在水深1~25 m垂向水温梯度相差较大,具体表现为:9月 >

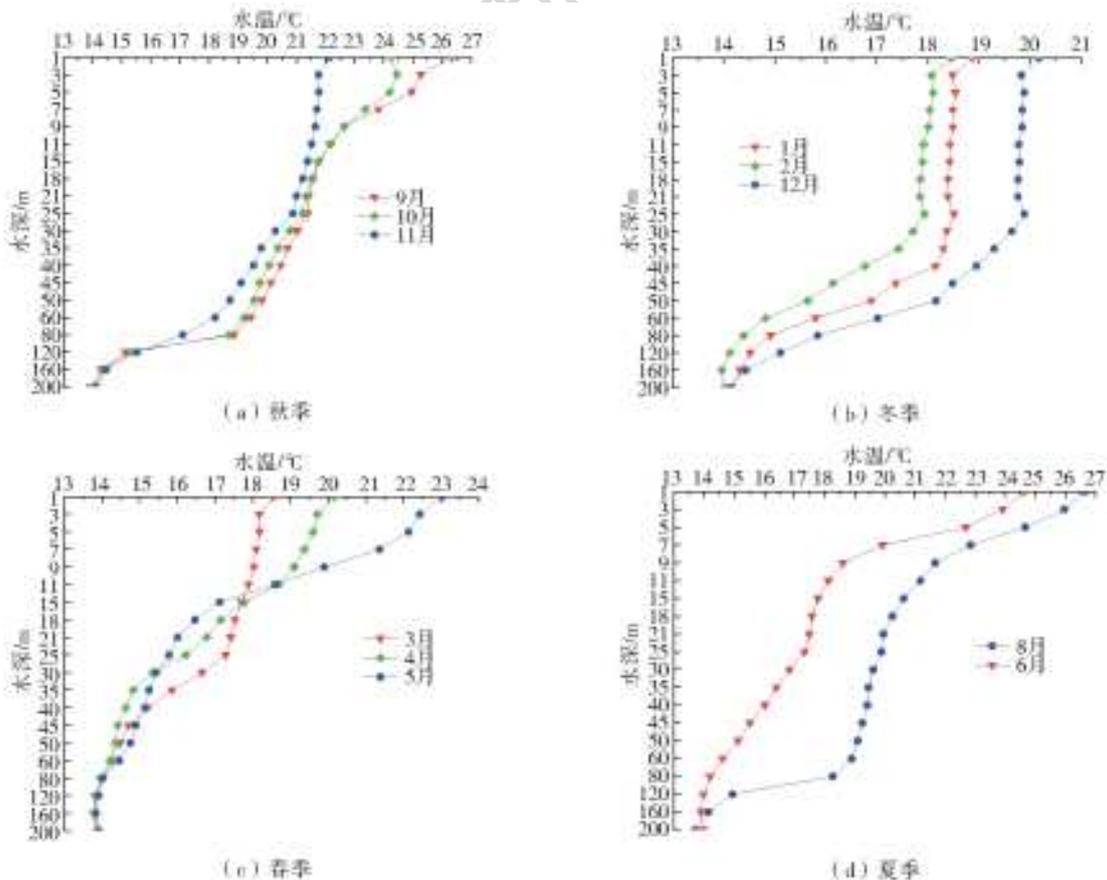


图5 小湾水电站坝前垂向水温四季变化

Fig. 5 Seasonal variation of vertical water temperature in front of Xiaowan hydropower plant

10 月 > 11 月。秋季为水库丰水期,上游下泄低温水水量较多,表层水温降低与深层低温水发生掺混,水温在垂向上的分层现象减弱。冬季气温降至全年最低,水温在垂向上变化幅度较小,表底层水温差出现全年最小值。冬季水温曲线变幅较小,在 3~25 m 水深范围内均出现稳定的温度层,从水深 25 m 处开始水温梯度增大。冬季水库上层水体与深层水体混合最为均匀,因此该阶段水温分层迹象为全年最弱。秋冬两季温变层大致出现在表层至水深 25 m 处,温变层厚度明显大于夏季。温跃层出现在水深 25~160 m,滞温层为水深 160 m 处至库底,水温全年保持稳定。

### 2.3 水温与气温相关性分析

水体对库区气候起调节作用,而气温又制约着水温变化,水温与气温之间的关系是库区生态水文过程的重要影响因素<sup>[25]</sup>。为研究小湾水库气

温、水温及其相应关系,利用实测气温数据与水库表层 1 m 和 3 m 水温数据,绘制出气温—水温关系图与各月平均表层水温—气温图,见图 6 和 7。小湾水库表层 1 和 3 m 水温和气温均呈正相关关系,且表层 1 m 水温与气温较 3 m 水温相关性更高。其原因是 1 m 处水温升高后通过热传导向下层水体传递多余热量,3 m 处水温升高慢。见图 7,表层水温对气温变化敏感,随气温变化发生相应变化,但水温变幅较气温小,同时水温最大值与最小值出现时间均比气温滞后。这是由于水体具有较大比热容,水温上升或下降需要吸收或释放大量的热量,升温 and 降温速度较慢。水库表层水体与大气直接接触,大气以热传导的方式直接作用于水体,表层水温受气温影响较大,与气温变化几乎同步,因此可在无法获取库表水温数据的情况下通过气温估算出水温。

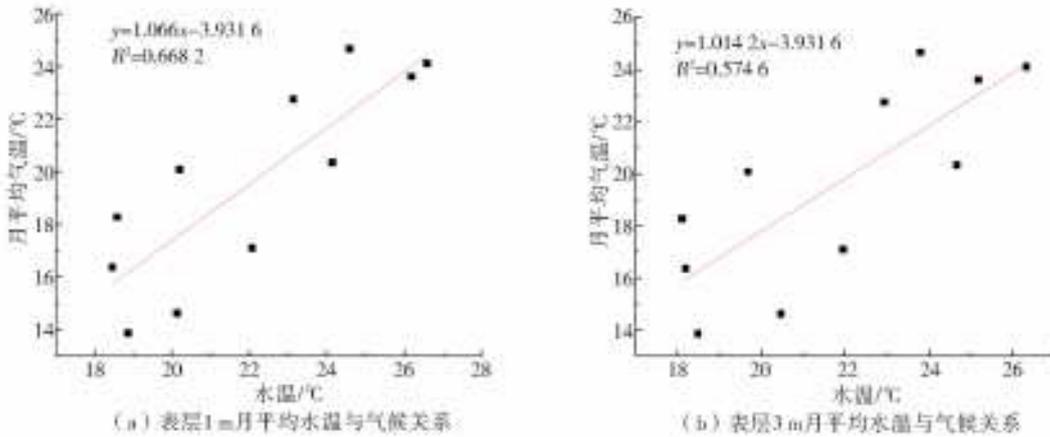


图 6 表层水温—气温关系

Fig. 6 Surface water-air temperature diagram

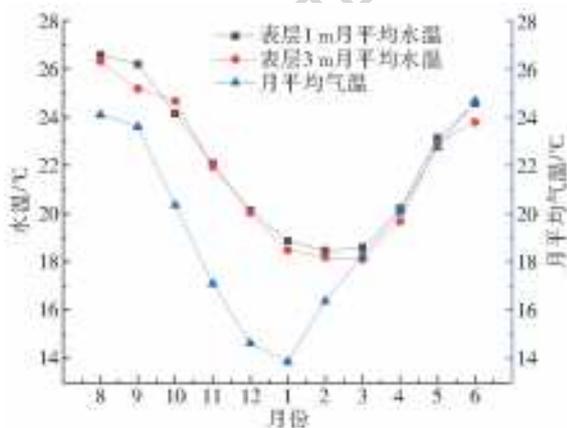


图 7 各月平均表层水温—气温关系

Fig. 7 Monthly mean surface water-air temperature diagram

### 2.4 温跃层特征分析

根据小湾水库坝前温跃层特征量(温跃层深度、厚度)在时间尺度上的变化情况(表 2)显示,温跃层

深度的变化特征大致为 2016 年 8—10 月基本不变,2016 年 10 月—2017 年 1 月上升,2017 年 1—4 月下降,2017 年 4—6 月基本不变。温跃层深度随着季节交替进行有规律的变化。夏秋两季日照时间长,日照强度较大,日气温变幅小,库表水温受影响小,温跃层深度稳定。秋冬交替时节气温下降,表层水温随之下降,进入冬季气温和水温将均至全年最低,上层水体与下层水体水温差减小,温跃层深度较秋季增加,深度最大值出现在 2017 年冬季的 1 月,为 35.65 m。春冬交替时节气温上升,上层水体与下层水体水温差增大,温跃层深度开始减小。各月温跃层平均厚度变幅较大,最大值和最小值分别为 2016 年 11 月的 48.5 m 和 2017 年 2 月的 18.7 m,相差将近 30 m。温跃层厚度的变化趋势与深度相反,厚度越薄,深度越深。

表2 小湾水电站坝前水体温跃层深度、厚度变化  
Tab.2 Depth and thickness of thermocline in front of dam of Xiaowan hydropower plant

月份	温跃层深度/m	温跃层厚度/m
8	1.00	24.40
9	1.00	40.00
10	1.00	41.88
11	7.00	48.50
12	27.45	37.74
1	35.65	18.87
2	32.14	17.50
3	17.97	23.35
4	1.00	33.50
5	1.00	21.13
6	1.00	41.67

### 3 结 论

通过分析小湾水电站2016年8月至2017年6月近一年的实测坝前垂向水温数据,得到以下结论。

(1) 各月表层1~3 m水深范围内水温受气象因素影响较大,变化幅度较大,底层160~200 m水温全年趋于稳定状态。全年水温相对水深变化率为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,2016年8月达到峰值约为 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ,最小值出现在2017年2月约为 $0.026\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

(2) 小湾水库为典型的分层型水库,坝前水温全年均存在垂向分层现象,并受季节影响明显。春季水温开始出现分层现象并逐渐加剧,夏季达到最明显,秋季开始减弱,冬季为全年最弱。

(3) 坝前表层水温对气温变化敏感,表层水温与气温呈正相关关系,水温变幅比气温变幅小且表层水温最值出现时间较气温滞后。

(4) 小湾水库温跃层为季节性温跃层,温跃层深度随季节发生变化,具体表现为:春季温跃层深度下降,冬季上升,夏秋两季处于稳定状态。温跃层厚度变化趋势与深度相反,各月温跃层平均厚度变幅较大,最大值和最小值分别出现在11月和2月,相差近30 m。

#### 参考文献(References):

[1] SCHAEFFER B A, LIAMES J, DYWER J, et al. An initial validation of Landsat 5 and 7 derived surface water temperature for U. S. lakes, reservoirs, and estuaries [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39 (22): 7789-7805. DOI: 10. 1080/01431161. 2018. 1471545.

[2] 刘晋高,徐雅倩,马骏,等. 三峡水库香溪河库湾不同异

重流下水温分层模式研究[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(4): 37-42. (LIU J G, XU Y Q, MA J, et al. Model of water temperature stratification in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir with different density currents [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 39(2): 7789-7805. (in Chinese)) DOI: 10. 11988/ckyyb. 20161150.

- [3] 龙良红,徐慧,纪道斌,等. 向家坝水库水温时空特征及其成因分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(5): 738-746. (LONG L H, XU H, JI D B. Temporal and spatial characteristics of water temperature in Xiangjiaba reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(5): 738-746. (in Chinese)) DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj201705011.
- [4] 宋策,周孝德,辛向文. 龙羊峡水库水温结构演变及其对下游河道水温影响[J]. *水科学进展*, 2011, 22(3): 421-428. (SONG C, ZHOU X D, XIN X W. Water temperature dynamics of Longyangxia reservoir and its influence on downstream water temperature [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(3): 421-428. (in Chinese)) DOI: CNKI: 32-1309/P. 20110514. 1449. 018.
- [5] 任实,刘亮,张地继,等. 溪洛渡一向家坝一三峡梯级水库水温分布特性[J]. *人民长江*, 2018, 49(3): 32-35, 40. (REN S, LIU L, ZHANG D J, et al. Research on water temperature distribution in Xiluodu-Xiangjiaba-Three Gorges cascade reservoirs [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(3): 32-35, 40. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2018. 03. 006.
- [6] TUO Y C, LIU Z G, DENG Y, et al. Water temperature of the Fengman reservoir with seasonal ice cover [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(5): 731-738.
- [7] 黄信坤,张劲松,邢领航,等. 分层水库不同高程孔口泄流的分层流特性研究[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(1): 91-94. (HUANG X K, ZHANG J S, XING L H, et al. Study on characteristics of stratified flow formed by different height discharging of stratified reservoirs [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(1): 91-94. (in Chinese)) DOI: 10. 11988/ckyyb. 20160833.
- [8] 龙良红,徐慧,鲍正风,等. 溪洛渡水库水温时空特性研究[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(4): 79-89. (LONG L H, XU H, BAO Z F, et al. Temporal and spatial characteristics of water temperature in Xiluodu reservoir [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(4): 79-89. (in Chinese)) DOI: 10. 11660/slf dx b. 20180408.
- [9] 孙昕,王雪,许岩,等. 一个分层水库温跃层的模拟与验证[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(2): 319-326. (SUN X, WANG X, XU Y, et al. Numerical simulation and verifications on thermal stratification in a stratified

- reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(2): 319-326. (in Chinese))
- [10] LIU M, ZHANG Y L, SHI K, et al. Thermal stratification dynamics in a large and deep subtropical reservoir revealed by high-frequency buoy data[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 9(215): 614-624. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.215.
- [11] 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 S J, PENG W Q. Water temperature structure and influencing factors in Ertan reservoir[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(10): 1254-1258. (in Chinese)) DOI: 10.132A3/cnki.slxb.2009.10.008.
- [12] 白杨, 张运林, 周永强, 等. 千岛湖水温垂直分层的空间分布及其影响因素[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(5): 906-914. (BAI Y, ZHANG Y L, ZHAOU Y Q, et al. Spatial distribution of the thermal stratification in Qiandao lake and its influencing factors[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(5): 906-914. (in Chinese)) DOI: 10.11693/hyhz20160400095.
- [13] 卞俊杰, 陈峰. 三峡水库蓄水后库区水温影响分析[J]. *水利水电快报*, 2006, 27(19): 7-10. (BIAN J J, CHEN F. Analysis of water temperature influence in reservoir area after impoundment of Three Gorges Reservoir[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2006, 27(19): 7-10. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-0081.2006.19.002.
- [14] 杜林霞, 牛兰花, 黄童. 三峡水库水温变化特性及影响分析[J]. *水利水电快报*, 2017, 38(6): 58-63. (DU L X, NIU L H, HUANG T. Analysis of water temperature variation characteristics and impacts of the Three Gorges Reservoir[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2017, 38(6): 58-63. (in Chinese)) DOI: 10.15974/j.cnki.slsdkb.2017.06.019.
- [15] 李忠顺, 陈永灿, 刘昭伟, 等. 密云水库水温分布特征[J]. *清华大学学报*, 2012, 52(6): 798-803. (LI Z S, CHEN Y C, LIU Z W, et al. Water in temperature distribution the Miyun reservoir[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2012, 52(6): 798-803. (in Chinese))
- [16] 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 B D, LI J, LI K F, 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)) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2009.04.006.
- [17] 朱春灵. 澜沧江小湾水库水环境和氮磷营养盐的时空分异[D]. 昆明: 云南大学, 2013. (ZHU L C. Spatial and temporal differentiation of water environment and nitrogen and phosphorus nutrients in Xiaowan reservoir, Minjiang River [D]. KunMing: Yunnan University, 2013. (in Chinese))
- [18] 李晋鹏, 彭明春, 董世魁, 等. 澜沧江小湾水坝运行前后大型底栖动物群落及水质评价[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(11): 1900-1908. (LI J P, CAI M C, DONG S K, et al. Assessment of benthic macroinvertebrate assemblages and water quality in Xiaowan reservoir before and after dam operation, Lancang River [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(11): 1900-1908. (in Chinese)) DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2018.05.03.
- [19] 胡佳纯, 黄小雪, 程香菊. 观音岩水库水温结构规律分析[J]. *中国水运*, 2016, 16(6): 201-204. (HU J C, HUANG X X, HCENG X J. Analysis of water temperature structure law of Guanyinyan reservoir [J]. *China Water Transport*, 2016, 16(6): 201-204. (in Chinese))
- [20] ARHONDITSIS G B, BREET M T, DEGASPERI C L, et al. Effects of climatic variability on the thermal properties of Lake Washington[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(1): 256-270.
- [21] 鲍其钢, 乔光建. 水库水温分层对农业灌溉影响机理分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(2): 69-72. (BAO Q G, QIAO G J. Impacts of reservoir water temperature stratification on agricultural irrigation [J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2011, 9(2): 69-72. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.02069.
- [22] ROBERTSON D M, RAGOTZKIE R A. Changes in the thermal structure of moderate to large sized lakes in response to changes in air temperature[J]. *Aquatic Sciences*, 1990, 52(4): 360-380. DOI: 10.1007/bf00879763.
- [23] YANG Y C, WANG Y W, ZHANG Z, et al. Diurnal and seasonal variations of thermal stratification and vertical Mixing in a shallow fresh water lake[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2018, 32(2): 219-232.
- [24] 刘明亮, 吴志旭, 何剑波, 等. 新安江水库(千岛湖)热力学状况及热力分层研究[J]. *湖泊科学*, 2016, 24(3): 447-454. (LIU M L, WU Z X, HE J B, et al. Thermodynamics and stratification in Xin'anjiang reservoir(Lake Qiandao) [J]. *Journal of Lake Science*, 2016, 24(3): 447-454. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-5427.2014.03.016.
- [25] 张月霞, 王慧梅, 张睿. 抚仙湖表层水温与气温关系研究[J]. *环境科学导刊*, 2018, 37(4): 26-29. (ZHANG Y X, WANG H M, ZHANG R. Study on the relationship between surface temperature and air temperature of Fuxian Lake[J]. *Environmental Science Survey*, 2018, 37(4): 26-29. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: YNHNK.0.2018-04-007.