

长江上游水库群的热环境效应与修复对策*

周建军, 杨倩, 张曼

(清华大学水利系, 北京 100084)

摘要: 本文根据实测资料揭示三峡水库运行以来冬季下泄水温抬高 5.32℃、夏初降低 3.45℃、过程滞后 30~43 天, 三峡水库冬季水温平均高于气温 10℃, 且随水库蓄水位和上游水库增加不断升高。长江是罕见的从高热河源流向低热潮湿地区的世界大河, 干流三峡等大型水库流量大、库容大且基本没有温度分层, 水库滞热、散热和下泄热量巨大, 下水温改变范围超过汉口。需要重视的两个宏观效应: 一是超温大幅降低水库和下水溶氧(DO), 影响程度已与长江平均化学需氧量(COD)等污染同数量级, 加上加速 COD 等耗氧, 水温升高的污染危害更大; 二是水库冬季巨大散热, 11-1 月库区平均散热强度 241 W/m²、总热功率 2.43 亿 kW, 下泄潜在热量 3.16 亿 kW、超过天然 1.73 亿 kW, 水库散发和下泄热量相当于全国平均用电功率。2030 年上游水电按规划全面建成后, 冬季上游水库群还将附加吸热 2 亿 kW (年热量 2 万亿 kWh)。DO 是大坝对天然河流环境改变的重要方面, 三峡支流库区现在连年水华、干流出现缺氧, 水温升高进一步降低 DO 浓度和促进环境耗氧是当前库区和下游生态环境的主要问题之一。冬季干热河谷输出热水、2030 年后更多梯级水库吸热并通过河流转移到三峡水库, 巨大附加散热量对周边环境、水资源、土壤墒情和局部气候影响需要认真研究。建议在干热河谷梯级水库大规模布局水面光伏(PPV)。一方面遮挡短波辐射抑制下游三峡入库水温进一步升高, 另一方面利用梯级水电巨大储能、调节优势与光伏资源, 互补互助、集约和大规模开发西南可再生能源与电力调节资源。本文研究显示 PPV 电量巨大和结构优势明显, 是改善我国电力能源结构和提升水电的发展方向, 还可带动更多绿色发展。

关键词: 水温; 热效应; 环境; 修复; 水面光伏; 梯级水库; 长江

Thermal-effect of the upper Yangtze reservoirs and countermeasures

ZHOU Jianjun, YANG Qian & ZHANG Man

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P.R.China)

Abstract: In this paper, we use observational data to reveal that water temperature (T) discharging from the Three Gorges reservoir (TGR) downstream has been increased in excess of 5.3℃ in winters, and delayed by 30-43 days with the pool T exceeding the local air by 10℃ when comparing with the pre-impoundment situation. This fact is likely caused by the thermal effect of TGR and other reservoirs upstream, aggravation with the increasing impoundments upstream. Due to the enormous flow discharge, storage and well-mixed in the warmed pool, quantity of the modified heat is so huge that T change can extend over 690 km. Two effects should be listed as prior environmental issues currently: 1) the effect on dissolved oxygen (DO) in the pool and downstream, which is probably lowered by a magnitude comparable to the level of the chemical oxygen demand of the Yangtze and 2) the effect of the additional heat released from the pool and discharged downstream of TGR in winter, which is estimated to be 243 GW (241 W/m² in density) and 173 GW in average in Nov.-Jan. (2014-2016). In addition, another 200 GW heat is going to be trapped by pools that are planned to be impounded before 2030 upstream in the hot-valleys through water absorption of solar radiation, which will also a stressing forcing of warming for the TGR in the future. DO is known as a key eco-property for surface waters. At present, harmful algal blooms constantly occur in the tributary pools, and hypoxia has already been observed in 2014 in the main pool of the TGR. The declining environmental status warns us to take the increasing pool T and associated DO depression as prior issue in the Yangtze River environment protection. On the other hand, as the Yangtze is unique in world large rivers that originates from warmer and intensive solar radiation valleys to an artificial mainstream mega pool in dimming and humid basin with the storing and detention of huge heat induced from the upstream pools on water quality and local evapotranspiration, soil moisture and

* 国家重点研发计划项目(2016YFE0133700)和国家自然科学基金项目(51509137)联合资助。2018-02-01 收稿; 2018-04-07 收修改稿。周建军(1960~), 男, 博士, 教授; E-mail: zhouji@tsinghua.edu.cn.

climate should thus deserve to be listed as key investigation. As a countermeasure, we suggest to restore the increasing thermal effect by installing pool photovoltaic power (PPV) in upstream hot-valleys. Except for inhibiting additional heat absorption, the PV in combination with the installing power and regulation advantages of the cascaded hydro power in southwest China can also produce significant renewable electricity and regulation facilities that are urgently desired by the coal dominant power system of China.

Keywords: Water temperature; thermal-effect; environment; restoration; pool photovoltaic power (PPV); cascade reservoirs; Yangtze River

长江是世界第三大河,上游汇集几十条南北支流,在宜昌以径流 4510 亿 m^3 进入中下游冲积平原. 长江宜宾以上金沙江、雅砻江、大渡河等上游支流都位于西南著名干热河谷,年太阳短波辐射强度 (GHI) 1700 kWh/m^2 ,而四川盆地及三峡周边河谷严重低热 (GHI 仅为 800 kWh/m^2 左右) (图 1). 河源从高热向低热地区流动进入四川盆地边缘,短距离内温热条件剧烈改变,长江为三峡河谷与中下游带来巨大水热,特别是冬季暖水进入三峡河谷使当地水温显著超过气温,加上又在干流建高坝大库,世界大河罕见. 水热运输循环把区域间气候环境条件紧密联系起来,大坝使长江上中游正经受最大的人为改变. 世界最大的三峡枢纽工程库容超过 40 km^3 、水库面积 1080 km^2 ;金沙江下游白鹤滩等四大梯级水库库容 42.7 km^3 、面积 580 km^2 ;长江上游累计建坝 13000 多座、库容 159 km^3 . 到 2030 年,由金沙江、雅砻江、大渡河、嘉陵江、乌江和长江上游干流等众多巨型水库群首尾相连形成的梯级水库群水面近 3000 km^2 ,其中近半在干热河谷地区. 水库使天然湍急河流隔断成湖库,河流形态和环境条件彻底改变并影响下游河流. 在当前工程生态环境影响中,水库改变水温及热循环是其中重要的改变之一^[1].

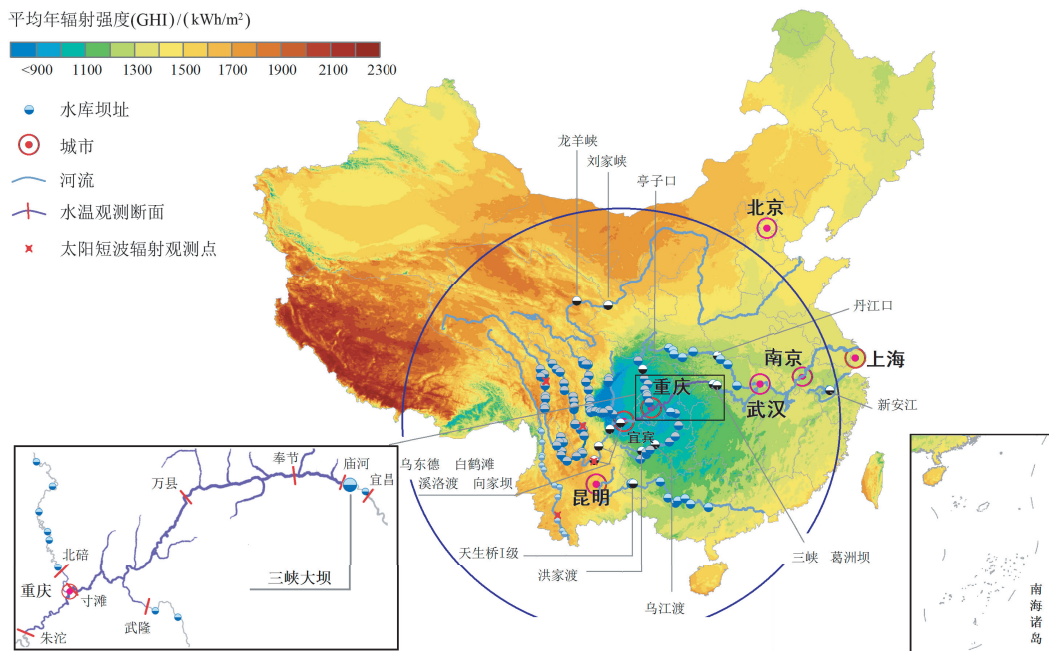


图 1 我国太阳短波辐射强度、长江上游大型水库群和其他相关大型水库和相关位置

(图中光伏是年总水平辐射强度 (GHI), 本文干热河谷地区 GHI 和 GTI 等数据来源于 Solar resource data @ Solargis (<http://globalsolaratlas.info/download/china>); 蓝圆圈是以宜宾为中心 1500 km 半径范围)

Fig.1 The distribution of annual solar radiation intensity in China and the locations of some large dams encountered (data from Solar resource data @ Solargis, <http://globalsolaratlas.info/download/china>)

我国已建大型水库改变温度较大,其强温热效应主要集中在高辐射和辐射强度变化剧烈地区(图 1 和表 1). 一方面水库大量滞留冬季水体使春末夏初下泄低温水,另一方面水库滞留夏热和增热又使冬季水温

升高. 黄河上游的龙羊峡 2006 年大规模蓄水后对下游河流(贵德站)7 和 12 月水温改变都超过 8℃^[2]; 红水河上游南盘江天生桥一级使下游初夏水温降低 5.5℃、12 月升温 7℃、全年平均水温升高 6.5℃、最低水温超过 18℃^[3]; 乌江渡春冬水温分别改变 7.5 和 4.2℃^[4]; 丹江口大坝加高前下游黄家港夏、冬季水温分别降低和抬高 4~6℃、鱼产卵时间推迟 20~30 天^[5]. 新安江水库水源位于相对低热地区, 滞温和低层低温水下泄降低下游水温, 使热水鱼类生长集温指标 ($GDD = \sum \max(T-15, 0)$, $T =$ 日均水温) 减小 37% 和热水鱼种消失^[6]. 在全球范围内, 河流在水库影响下水温都受到不同程度的影响^[7]. 由于温度对水密度影响和水库掺混降低, 多数水库出现温度分层, 水库热效应关联水体相对较小, 在坝前采取选择性引水等方式一般可以舒缓对下游的影响^[7-9]. 但是, 实际资料显示三峡水库在库区几乎没有形成稳定的温度分层^[10], 而且 2008 年后蓄水提升到设计 175 m 正常水位后, 水库垂向温差进一步减小.

表 1 我国部分大型水库下游春夏季降温和冬季升温情况

Tab.1 The water temperature altered by some large reservoirs in China

工程名称	河流	库容/亿 m ³	降温(-)/℃	升温(+)/℃	水库温热结构
龙羊峡	黄河	247	9.0	8.1	温度分层 ^[2]
刘家峡	黄河	57.0	3.31	4.83	夏季分层 ^[11]
天生桥 1 级	红水河	84	5.5	7	温度分层 ^[3]
乌江渡	乌江	21.4	6.5	5.0	过渡型分层 ^[4]
洪家渡	乌江	44.97	7.5	4.2	温度分层 ^[4]
新安江	新安江	178.4	6.3	1.4	温度分层 ^[6]
丹江口	汉江	174.5	4~6	4~6	温度分层 ^[2]
葛洲坝	长江	15.8	1.5	0.5	温度变化很小 ^[12]
三峡	长江	427	4.4	4.4	温度不分层 ^[10]

三峡是在大河干流建坝形成近 700 km 超大的河道型水库, 库区流量大和掺混条件好, 发生密度分层条件较差. 但是, 受季节变化、蓄水蓄热的惯性和上游入库水温影响依然产生大幅度的温度改变. 当前, 仅三峡水库已显著改变库区和下游河流温热节律, 夏初低水温, 冬季高水温并显著高于气温. 而且, 三峡区间与上游金沙江干热河谷存在巨大辐射条件差异(图 1), 水的热容、短波辐射吸收率和储热能力都显著高于陆地^[13], 上游干热河谷大量水库蓄水后还会大量增加吸热和集热, 在河流作用下大量转移到下游的三峡水库和三峡下游. 对这样大尺度水体温热改变和调控, 目前没有现成方法. 我国水利工程规划没有把水库热效应作为问题研究, 大型梯级水库综合热效应影响及解决途径更没有系统解决办法. 同时, 水温是水域生境、环境和健康的决定变量^[14-16], 水温改变直接影响水体溶解氧(DO)和复氧能力, 库区和坝下生态条件都会相应改变^[17]. 三峡水库是当今世界大河干流建坝控制的最大人工水体, 1.6 亿人口之下, 巨大入库污染负荷和库区环境条件与下游几亿人生产生活息息相关, 水库环境安全重要性远超过其他水库. 特别是 2030 年上游大型水库群全面蓄水后, 还受全球变暖、流域生态环境变化、水库群相互作用及人工控制等复杂过程影响. 研究长江三峡等上游水库温热效应和抑制措施具有重大现实意义.

本文主要根据实测资料揭示三峡水库温热变化、环境影响和问题, 以及上游水库群可能的进一步影响. 作为对策, 本文提出并初步研究了大规模水库水面光伏(PPV)与梯级水电捆绑发展. 一方面藉以抑制上游梯级水库群进一步增热和三峡等水库水温升高, 同时探讨在长江经济带“不搞大开发”前提下上游“生态优先、绿色发展”的一个可能方向. 供长江资源环境保护研究和长江经济带建设决策参考.

1 三峡水库的水温变化

三峡水库 2003—2005 年按 135~139 m 水位运行、蓄水 124 亿~142 亿 m³、回水 480 km; 2006—2008 年最高水位 156 m、蓄水 235 亿 m³; 2008 年汛后开始试验性蓄水、2009 年达到正常水位 175 m, 最大蓄水量超过 400 亿 m³. 2006 年前水温改变相对较小, 2008 年后库区和下泄水温变化加大. 金沙江向家坝(2012 年)和溪洛渡(2013 年)、嘉陵江亭子口(2013 年)和乌江下游构皮滩(2011—2014 年)等更多水库蓄水后, 三峡入

库水温升高(2013—2016年朱沱、北碚和武隆年均水温比2004—2012年升高0.4、0.76和0.2℃),库区和下泄水温进一步抬高。

图2A是2003年三峡水库蓄水后不同时段宜昌等断面水温及变化情况。2003年6月—2014年寸滩入库水温与蓄水前(1993—2003年)无明显变化,2003年(2003年6月—2008年)下泄水温已经改变。2009年后(2009—2014年)随着水位升高改变显著。春末夏初(3—5月)宜昌水温比同期寸滩和历史平均水温降低,而秋冬(9—2月)显著升高。2009年后,5月初宜昌水温比寸滩水温低5.7℃、比三峡水库蓄水前宜昌水温低4.4℃,11—1月宜昌水温比寸滩和三峡水库蓄水前抬高4.1和4.4℃。2004—2012年和2013—2016年平均值与蓄水前(1991—2002年)比较,宜昌平均水温上升了0.44和0.94℃。尽管下游还有清江和洞庭湖等支流汇入,但秋冬季汉口平均水温仍然超过三峡水库蓄水前10年平均2.8℃,5月降低1.6℃。三峡改变水温的影响范围超过了汉口,距离超过690 km。

2013年前后,三峡上游干支流的一些大型水库相继蓄水,三峡干(朱沱)支(北碚和武隆)冬季入库水温升高,使三峡下泄水温进一步升高(图2B)。2014—2016年,冬季(12—1月)朱沱、寸滩、北碚和武隆断面平均水温比2004—2012年分别升高2.75、1.92、1.83和1.80℃,下游宜昌和汉口比2008—2012年进一步升高0.82和2.39℃、比1991—2002年平均升高4.82和3.41℃,上游水库蓄水明显抬高了三峡水库冬天升温幅度,同期宜昌年最高水温降低0.792℃而最低水温升高2.15℃(2004—2012年只升高1.31℃),上游水库进一步抬高三峡及其下游最低水温。2013—2016年与2009—2012年比较,上游水库使宜昌和汉口4—5月最大降温从4.7和2.0℃分别缩小到3.5和1.58℃,春末夏初水库低温得到一定缓解,原因是上游干热河谷水库2—4月水温高、增加三峡入库流量和热量(2013—2016年朱沱+北碚+武隆平均热量比2009—2012年增加33.6%)。干热河谷(攀枝花站)2—4月平均气温比三峡水温高10~14℃,白鹤滩等巨型水库蓄水后,春季进入三峡流量和热量都会更显著增加,届时三峡下泄低温水问题可望更大程度缓解,而冬季升温会更大。

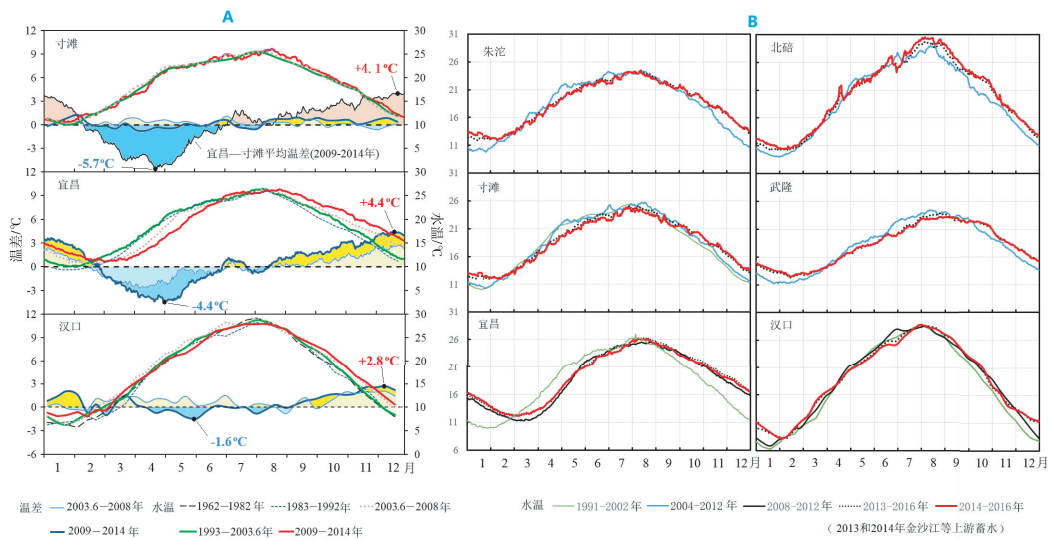


图2 三峡水库蓄水前后入库(寸滩)、出库(宜昌)和下游(汉口)水温和增温(温差)(A)以及上游向家坝、溪洛渡和亭子口和乌江水库先后蓄水对三峡入、出库水温的影响(B)
(图A温差是给定时段与同断面蓄水前(1993—2003年6月)比较,
但图A(上)“宜昌-寸滩平均温差”是异地同步温差)

Fig.2 Water temperature variations at the inlet, outlet and a downstream gauging station at Hankou (A) and the influence of warming caused by the upstream hypolimnetic-release reservoirs (B)

国内外(表1)^[7,9]大量观测资料显示,水库改变河流温度使密度变化导致分层和温差异重流。因此,增加吸热条件下,一般水库下层水温改变并不大,甚至产生低温。但是,三峡水库是一个特例。因为处于大河干

流,流量(速)大、掺混强,库区很难形成稳定温跃层.图3是2007—2012年坝前庙河实测断面最高和最低水温与下游宜昌水温(相当于平均水温)的比较.除4—5月外,宜昌与庙河最高、最低水温基本一致(冬季略低是因经葛洲坝及其坝下45 km 散热降温),4—5月宜昌与庙河表面最高水温也基本一致.库底低温是因为这时水深大、表层升温快,上下层来不及掺混,但水库垂线温度分布仍比较均匀、底层低温范围小和影响不大.5月水库集中消落开始后庙河断面上下温差迅速消失.均匀升温表明三峡水库热效应环境影响和规模更大,调控更困难.

2008年后,宜昌冬、春季水温分别比天然推迟了43和30天.在无温度分层条件下,如此大的滞后完全是因为三峡水库的大尺度造成的.可以估算,冬季三峡水库水体置换时间超过50~60天,这正是图3中庙河断面底部的低温水持续时间长度.水库滞热时间与水体在库区滞留时间相当,河道型水库尺度越大滞后越长,这是一种惯性.由于掺混强、不分层和全水深温度改变和蓄热,三峡水库与其他相同程度水温变化水库(表1)相比,热量变化规模要大很多.这是大河干流大型水库温热效应的一个重要特性,相关热量和环境作用远大于其他水库.

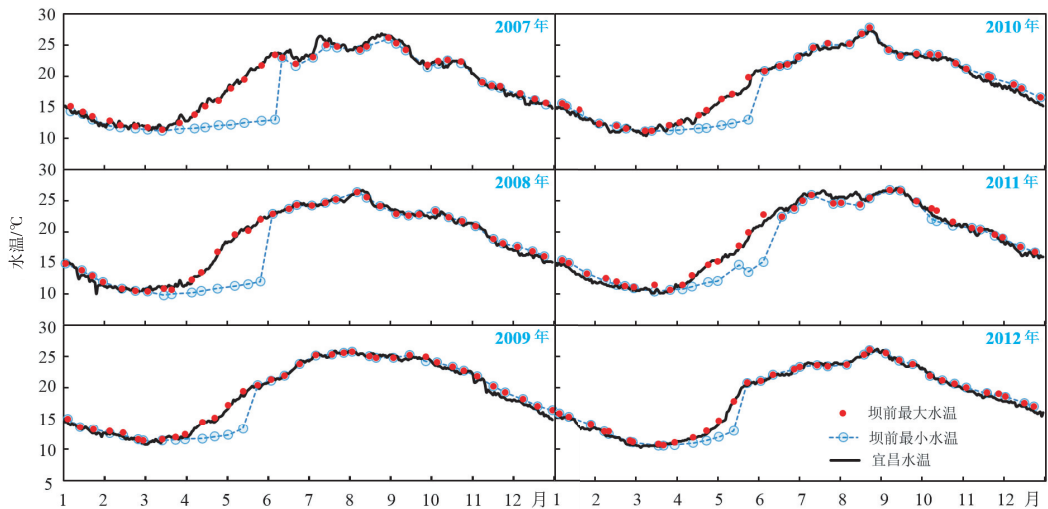


图3 三峡大坝下游(宜昌)与坝前(庙河断面)最大、最小实测水温比较

(最大、最小水温根据三峡坝前庙河断面(距坝15 km)最深垂线18个点实测温度剖面数据得到,

温差值反映断面水温分布情况,温差小水温分布均匀,4—5月底部升温较慢、温度偏低,

上下最大温差达5~10℃;实测温度剖面资料显示库区基本上没有形成稳定温差异重流

(2007—2009年4月庙河有短期温跃层,但2009年水库蓄水到175 m后温跃层消失;

另外,庙河冬天略高于宜昌平均水温0.5~1℃是因为经过葛洲坝水库到宜昌断面(约45 km)放热))

Fig.3 Comparisons of the measured water temperatures at Yichang with that at a section in front of the dam (Miaohe) with max and min water temperature close to the surface and near the bottom

三峡及上游水库改变宜昌和长江中游水温只是热效应一个方面,更重要的是因此形成一个巨大放热体.三峡水库蓄水后,冬季12和1月宜昌水温升高到17.2和15.3℃,水温超过气温10℃(图4),一些年份(如2014年)水温长期高出气温13℃,11—12月水温高于18℃(图2).天然情况下,长江水温高于宜昌气温5℃左右,由于冬天流量小和水体散热面积小,热水影响范围不大.从高向低热地区流动是长江的重要特点之一,这也是三峡水库一个重要环境条件,由于上游干支流多在干热河谷高热辐射地区,而三峡冬天气温低、短波辐射弱和相对湿度大,水库造就一个巨大人工散热水体.加上水库使宜昌枯水流量明显增加,温度大幅抬高也更增加了冬天进入长江中游热量.现在,三峡冬季在库区(600~700 km)和中游很大范围内(至少690 km)形成一个巨大高温热源(热脊).这对阴冷、低热和潮湿的三峡区间和中游(图1)自然环境和气候带来了重要的环境条件改变.

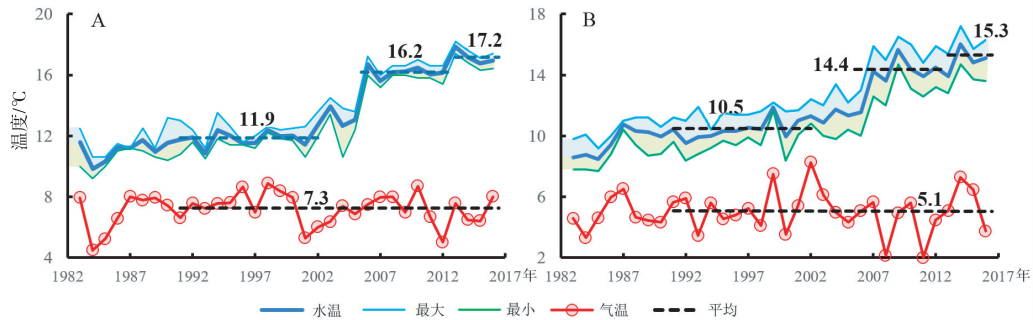


图4 宜昌断面 12 月 (A) 和 1 月 (B) 平均、最高、最低水温 (阴影) 与相应气温比较

Fig.4 Comparisons of the pool and air temperatures in Dec. (A) and Jan. (B), indicating great over-warming of the TGR

三峡水库改变河流水温及过程涉及范围大、水量大、热量大,生态调度与发电等兴利运行矛盾很大,选择性取水等工程措施难以控制或抑制下泄高水温和热污染,上游干热河谷地区更多水库还将进一步增加吸热和提高三峡入库水温,抑制三峡水库冬季水温进一步升高、保护库区水质和降低水库散热等环境效应都将面临很大挑战。

2 水库温热改变的环境效应

温度是自然水体的基本环境变量。一方面,水温升高降低饱和 DO、刺激微生物代谢和水(底泥)污染物耗氧,甚至导致水体缺氧等问题,水温与水域环境质量密切相关^[18-19]。除直接降低 DO 外,热还会加剧水中污染分解而产生更大程度耗氧。从这个意义上看,热是一种强烈污染。特别是三峡水库承接污染负荷远大于如表 1 所列的其他大型水库和一般湖泊,高温使库区和下游水质保护成为重要问题。水库推迟水温季节对河湖生境有强烈影响,春末低温和秋季高温严重影响“四大家鱼”和中华鲟等洄游鱼类^[20-22]。特别是三峡下泄水温到 12 月上旬仍高于 18°C,使中华鲟产卵条件很难满足,2013 年后长江中游再没有观测到自然产卵。另一方面,水库冬季形成了一个水气温差程度和规模巨大的热源,超过当今任何城市热岛。水库和下游高温散热对库区和长江中游水气蒸发、土壤墒情(干旱)和其他环境影响也值得关注。

2.1 水温升高对水环境影响尺度

温度升高和缺氧是当今地表水所面临的共同问题,而且热与污染和缺氧还相互作用^[23]。河湖 DO 状况除受污染、季节和水生生物代谢等影响外,主要与水温直接相关^[24],水温升高直接降低水的溶氧能力和 DO 浓度。水温是水环境质量的主要和关键指标。

水的饱和 DO 直接由水温决定^[25]。三峡冬季水温升高 5°C、超过环境温度 10°C (图 4),可直接减少或降低饱和 DO 相对水平 1.0~1.2 和 2.3~2.5 mg/L (图 5A)。三峡水库蓄水前(1998—2003 年),库区距大坝 120 km 官渡口和坝下黄陵庙断面全年 DO 浓度 7.8~10.5 mg/L、DO 饱和度 91%~95%;2010 年以来这两个断面相应 DO 浓度和饱和度分别降低到 6~9 mg/L 和 70%~92%^[26]。2010 年后,长江口淡水河段秋、春季平均 DO 浓度为 7.0~8.5 mg/L^[27]。可见,水库和上述程度温度改变直接减少 DO 浓度 13%~15%,三峡库区溶氧能力比正常情况低 30%左右。

考虑到水温升高还会加快水中污染物分解和生物代谢耗氧,水库低流速降低氧饱和度,特别是三峡水库底层水温依然很高,底泥中有机质和污染物在冬季也能大量释放出来,水库水温升高对 DO 的影响作用更大。实际上,2014 年 12 月在三峡库区奉节至坝前段的中低水层已经监测到严重缺氧,超过 100 多 km 的 DO < 3 mg/L^[29]。当然 2014 年三峡水温略高,但在今后温度偏高或干旱年份,这种缺氧情景或将经常发生,这是非常严重的问题。

我国地表水水质评价的主要污染指标是 COD,它是度量河流污染程度的综合指标,可见污染可以通过

耗氧能力来度量. 在这个意义上, 水库使长江水温升高也是一种污染, 其作用可与河流 COD 进行定量比较. 根据监测资料(图 5), 长江在三峡入库的寸滩等断面平均 COD 浓度在 2 mg/L 左右. 2012—2014 春秋季长江出海淡水平均 COD 浓度分别在 2.5 和 3.5 mg/L 以内^[27]. 可见, 目前三峡水库秋冬春水温升高所能影响 DO 程度已与河流污染物耗氧同数量级. 若不高度重视水利工程的环境影响, 要降低与上述程度温升当量的 COD 需付的代价将十分巨大.

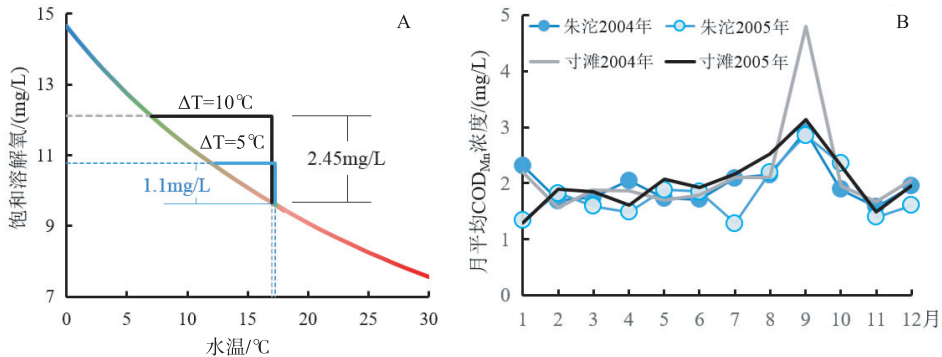


图 5 饱和溶解氧与水温的关系 (A) 揭示高温水影响溶解氧与 2004—2005 年三峡入库 COD_{Mn} 程度相当 (B) (饱和溶解氧根据公式 $DO = 375 / (33.5 + T)$ 计算^[25]; 寸滩和朱沱 COD_{Mn} 平均浓度依据实测 COD_{Mn} 通量^[28] 和水量计算)

Fig.5 The saturated DO in the reservoir should be remarkably lowered by the elevated water temperature (A) that can be about the effect of COD in the TGR in 2004–2005 (B)

长江上游河流在过去 20 余年已逐步被梯级水库替代. 上游流域面积和人口数量大, 水库承受和沉积污染负荷比一般湖泊大. 2007 年长江入河 COD、氨氮、总氮、总磷分别为 612.2 万、61.5 万、233.4 万和 32 万 t^[30], 2011—2015 年长江出海 COD、氨氮和总磷为 491 万~1080 万、13.2 万~15.4 万和 12.2 万~7.1 万 t^[31], 磷等大量污染转移到库底成为内源^[29], 库区总磷、总氮实际上已与太湖相当, 2011—2014 年库区干流水质为 III~IV 类, 藻类密度比建库前提高一个数量级, 支流库区 I~III 类水质比例不足 50%、连年水华. 更因为三峡水库不分层和底层水温同步升高(图 2B), 其环境作用明显高于同温滞效应的其他水库. 水温高、上下层间热、营养和污染物交换频繁, 这都利于激发底泥中磷等分解和快速进入光合作用更强的表层、促进藻类生长和腐败耗氧. 冬季高水位、低流速期间, 三峡水库与一般湖泊环境性质应该类似, 但现在采用环境容量高的河道标准评价. 若按湖泊标准评价, 三峡水库环境质量应更低. 考虑到支流库区和库湾已常发生水华和缺氧, 污染累积和热的共同作用下, 今后干流库区发生大范围水华风险很大.

当前上游干支流白鹤滩等巨型水库仍在建设之中, 2030 年后干热河谷地区大量增加水库水面, 水面吸热通过河流会大量转移到下游, 特别是位于最下游的三峡水库和长江中游进一步抬高水温, 加剧大范围水华和缺氧的风险. 一旦干流暴发水华, 刺激更多污染(包括底泥氮磷)释放和缺氧, 库区和下游水生态系统和环境容量将会受到严重破坏. 这是三峡水库和长江中下游必须高度重视和重点防御的危机.

2.2 水库散热效应

水库增加吸热、储热和滞热效应改变河流水温, 再通过增加蒸发、对流和辐射等方式异时和异地散热、改变区域水热循环和平衡. 本文计算了三峡水库增加的库区散热, 下游潜在散热通量和上游干热河谷地区梯级水库群将进一步吸热的数量级. 初步揭示长江上游散热效应的可能尺度.

2.2.1 三峡水库附加散热量 三峡水库最大水面面积 1080 km², 冬天水温平均超过当地(宜昌和巴东平均)气温 10°C(图 4), 日水气温差可超过 10~13°C. 这一水体水面散热及其过程是其高温热源重要环境特征. 在天然陆面基础上, 水库水面增加的散热通量(附加散热量 ΔF)可根据下式计算:

$$\Delta F = (E + H + L_u + \alpha S_d)_{\text{pool}} - (S_d + L_d) \quad (1)$$

式中, $()_{\text{pool}}$ 代表水面通量, E 为水面蒸发潜热, H 为显热, L_u 为向上长波辐射, L_d 为大气向下长波辐射, S_d 为地面太阳短波辐射, α 为短波反射率(通量单位都是 W/m^2). 公式(1)中第 2 项代表陆面散热量, 假设陆

面热平衡可得 $S_d + L_d = (E + H + L_u + \alpha S_d)_{land}$; 水面潜热和显热分别按 Penman^[32] 提出的水面蒸发公式和波文比法公式 $H = \gamma E(T_s - T_a)/(e_s - e_a)$ 计算(式中, γ 为湿度计常数, T_s 为水面温度, T_a 为气温, e_s 和 e_a 分别为水面饱和水汽压和空气水汽压); 太阳短波辐射按 Angström 公式 $S_d = (a_s + b_s n/N) S_0$ 计算(式中, n 和 N 分别为实际和最大日照时数, a_s 和 b_s 为常数, S_0 为大气顶短波辐射强度); 水面长波辐射按 Stefan-Boltzmann 公式 $L_u = \sigma T_s^4$ 计算($\sigma = 5.87 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)^[13]; 大气向下长波辐射按 $L_d = 8.733 \times 10^{-3} [1 + 0.26(1 - n/N)] \sigma T_a^{4.788}$ 公式计算^[33], T_s 和 T_a 都是绝对温度. 计算所依据资料包括水温(根据实测的三峡出入库逐日水温沿程插值)、水库面积(根据三峡逐日坝前水位和水库面积-水位关系推算)、实测逐日流量(朱沱、寸滩、宜昌、北碚和武隆)和气象数据(重庆、梁平、万县、奉节、巴东和宜昌日平均气温、相对湿度、风速和日照时数). Angström 常数根据重庆实测资料^[34] 以气温为参数拟合经验公式计算; 水面短波反射率为 4%. 附加散热量按重庆、梁平(代忠县)、万县、奉节、巴东和宜昌各站分别计算后平均计算总量.

2004—2016 年库区逐日附加散热量过程及其时间分布见图 6. 时间上, 较大附加散热量主要集中在冬季(11—1月), 而春夏(3—9月)水库散热与陆面没有显著差别; 空间上, 近坝库段(巴东—宜昌)比上游(重庆等)附加散热量大. 随着水库蓄水位抬高和溪洛渡等上游水库影响, 附加散热量逐年提高(水库上段散热强度也增加), 2014 年以来附加散热量最大. 这些特征与冬季三峡水库下段水温高、气温低以及水库和入库水

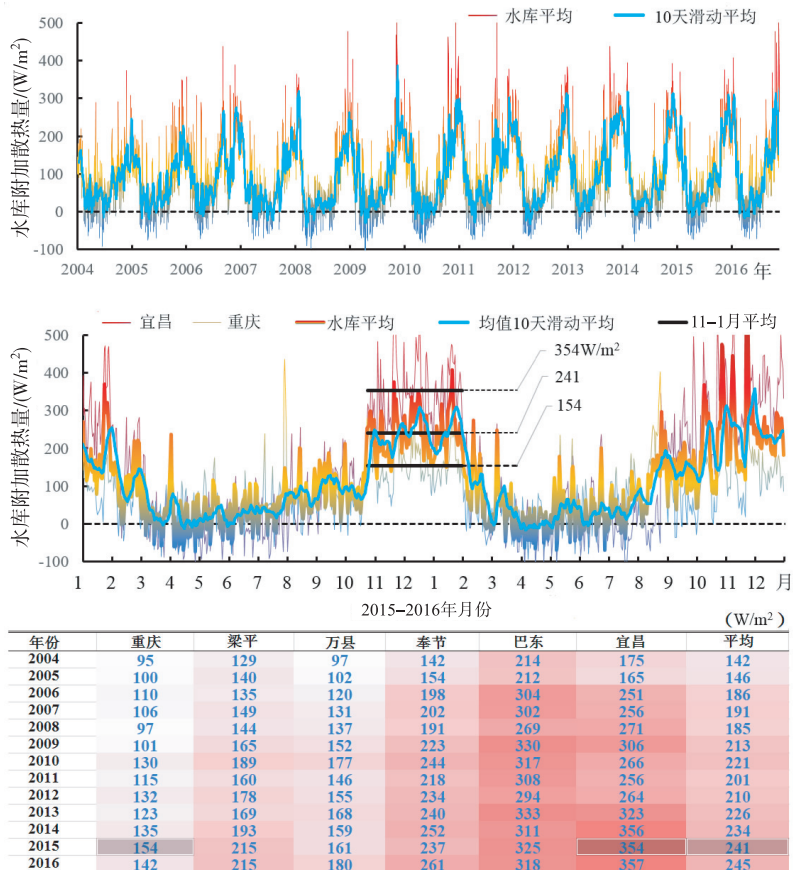


图 6 三峡水库重庆至宜昌多站水面附加散热量的时空分布

(1, 附加散热量 (W/m^2) 是水面向上热通量(含长波辐射、短波反射、潜热和显热)与陆面向上热通量之差(公式 1); 2, 上: 2004—2016 年水库平均附加散热量和滑移平均过程; 中: 2015—2016 年重庆、宜昌和多站平均附加散热量; 下: 重庆至宜昌各年多站冬季(11 月 1 日—1 月 31 日)平均附加散热量)

Fig.6 Temporal and spatial variations of additional heat flux that is induced by warming pool of the TGR

温逐年攀升规律一致. 2015年11月—2016年1月,宜昌、重庆和水库平均附加散热强度分别是354、154和241 W/m²,期间最大水库和宜昌的日均散热强度已接近和超过500 W/m²,三峡水库总散热强度2.43亿kW.

2.2.2 三峡下游潜在附加散热通量 水库散热的同时也增加向下游输送热量. 由于下泄热量与背景气温相关,故称为潜在附加散热量. 冬处长江中游越向下游气温越低,这种潜在热量很大程度会释放出来. 冬天三峡下泄水温显著高于天然水温和长江中游气温,春天气气温差低于天然,夏天水温改变不明显(图7). 2004—2014年冬天(11—1月),宜昌、荆州和武汉平均气温8.2、7.3和7.1℃,而2013—2016年宜昌平均水温17.8℃. 因此三峡下泄热水在中游具有很大的散热潜力. 根据2013—2016年宜昌流量、水温和气温资料,可计算三峡水库蓄水前后输入中游潜在附加散热量过程(图7). 三峡水库蓄水前(1991—2002年),宜昌冬季平均水气温差4~6℃,输入长江中游平均潜在附加散热量1.43亿kW,这是自然长江对中游的热补给,是长江塑造中游河湖生态的一个重要条件. 现在(2013—2016年)宜昌平均水气温差提高到9.7℃,输入中游平均潜在附加散热量提高到3.16亿kW. 三峡水库增温使宜昌向长江中游输入的潜在附加散热量增加了1.73亿kW.

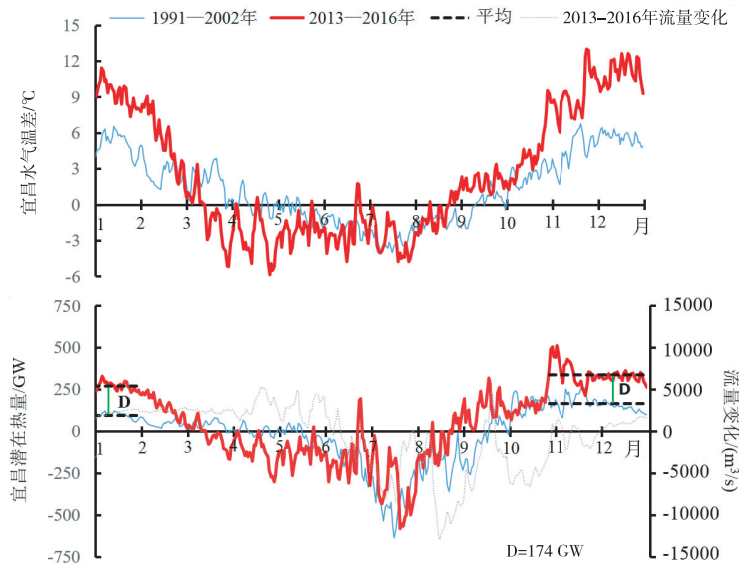


图7 三峡水库蓄水前(1991—2002年)、后(2013—2016年)各月宜昌水气温差和三峡输出潜在热量(潜在热量计算公式为 $H = 4.2Q(T_w - T_a)/1000$ (单位GW),式中, Q 为2013—2016年与1991—2002年逐日平均流量, T_w 和 T_a 为宜昌逐日水温和气温.三峡水库蓄水后汛期和秋季(10月)流量大幅度减小,12—6月上旬流量增加(其中4—5月水库消落期增加较多);冬季(11—1月)三峡输送到长江中游的潜在热量很大.水库平均增加输出热量1.74亿kW,4—5月水库下泄低温水减热,夏季放热无明显变化)

Fig.7 The average pool temperature and potential heat flux released at Yichang in 1991—2002 and 2013—2016

2.2.3 三峡上游水库群将增加的吸热通量 更进一步,在三峡上游还有大量在建和计划2030年前蓄水的大型水库,这些水库主要分布在金沙江、雅砻江和大渡河上游干热河谷地区. 根据规划估算,水库总水面超过1280 km². 考虑到水体比陆地吸热率高、储热量大和散热慢(陆面基本上可逐日热量平衡),这一地区陆地变成水库水面后强短波辐射和暖冬气候将大量增加吸热,同时夏天水库蓄留的高温余热也会更多储存下来影响冬季水温. 这些热在短时间内很难就地释放,必然通过河流转移到下游河道和下游水库,进一步增加三峡入库热量、冬季超温和附加散热量.

干热河谷地区水库受调度和蓄泄过程影响,蓄热和水热循环转移过程非常复杂,考虑到三峡和长江生态环境的重要性,应抓紧开展系统研究. 由于该地区冬季气温较高(攀枝花2003—2014年12—1月平均气

温为 13.5°C), 水库就地散热较小, 作为初步, 可以根据规划水面大小和辐射强度资料概算其吸收短波辐射热量的规模. 图 8 是 2006—2017 年地区平均日辐射强度 (水平辐射 GHI 和倾斜辐射 GTI) 分布、强度季节变化和水库群吸热强度. 多年平均日辐射集中在 $8:00-19:00$, GHI 日最高强度为 $640(534\sim 675)\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、能量为 $4.45\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{d})(1625\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a}))$; GHI 高峰在 5 月、辐射量为 $5.35\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$; 11、12 和 1 月与 5 月辐射比为 0.75 、 0.68 和 0.75 . 与光伏发电关系密切的 GTI 最高辐射强度在 2 月、日辐射量为 $6.27\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 11、12 和 1 月平均辐射量为 5.43 、 5.34 和 $5.68\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$. 冬天 GTI 高有利于利用水面光伏发电和水电互补 (水电枯水季节出力小). 按 4% 的反射率估算, 该地区水库在 11—1 月平均吸热强度为 1.98 亿 kW, 每年总体增加吸热量为 2.04 万亿 kWh. 再加上滞热, 长江上游大型水库对下游的增热量应远大于此. 目前, 太阳辐射对三峡水库水面冬天自身增加的吸热强度远低于上述值, 今后干热河谷水库巨大增热对最下游的三峡水库以及长江中下游的进一步影响是不能忽略的重大问题.

上游大量增热会使三峡入库水温进一步抬高. 一方面对缓解春夏 (4—5 月) 三峡低温水有所帮助 (这今后或不是问题), 另一方面进一步抬高冬季三峡水库水温和附加散热量. 目前, 在三峡区间和长江中游已形成超过 1000km (三峡水库 700km , 下游到洞庭湖口 451km 、到汉口 690km)、水气温差超过 $8\sim 10^{\circ}\text{C}$ 、库区平均散热强度 $241\text{W}/\text{m}^2$ 、水库总附加散热量为 4.16 亿 kW 的高温热源. 这一热规模相当于 22 个三峡电站按设计容量满负荷发电出力, 与世界最大耗能国家用电功率相当 (2012 年中国和美国年耗电平均功率分别为 5.5 亿和 4.7 亿 kW), 水库超温作用比全球变暖导致的内陆水体升温幅度高 10 倍 (1985—2010 年内陆水体升温约 1°C)^[24].

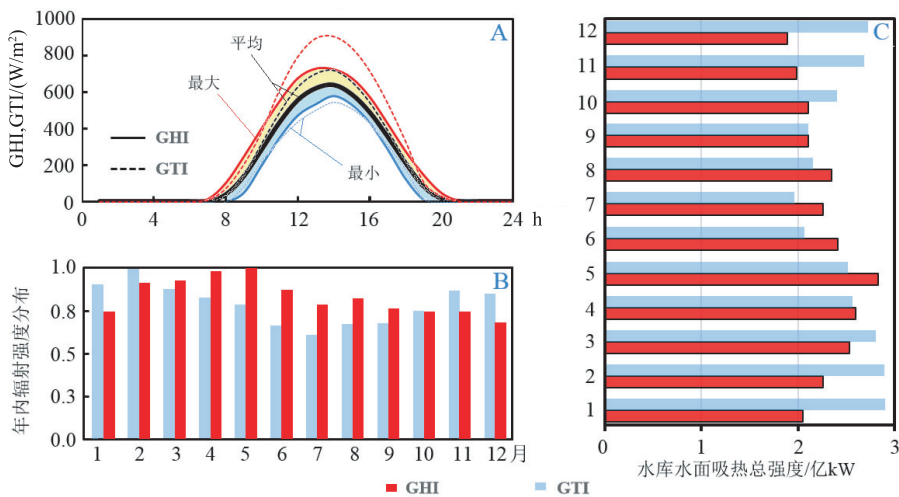


图 8 干热河谷地区多年平均太阳能 (粗实线 GHI 和细虚线 GTI) 日辐射强度 (A)、辐射强度逐月分布 (B) 和上游水库水面吸收短波辐射月平均强度 (C) (GHI 和 GTI 辐射资料根据普洱、西昌、乌东德、叶巴滩 (图 1) 四站 (2006 年 7 月 1 日—2017 年 5 月 31 日) 实测小时数据按空间平均计算, 水库群面积为 1280km^2 , 水面反射率为 4%)

Fig.8 Average distribution of solar radiation GHI and GTI (A), monthly GHI and GTI (B) and pool absorbing energy (C) in the dry and warming valleys in the upstream Yangtze River

目前很难全面评价上述大尺度水库附加加热的环境效应. 但其规模可与当前公认最大改变局部气候的人造热源^[35]——城市热岛 (UHI) 比较. UHI 是城市地面硬化、人为增热、吸热改变、建筑储热和对流条件改变等造成的局部气候现象^[36], 它对城市及局域环境与健康已构成严重威胁^[37-42]. 我国主要大城市 UHI 强度 (核心区与不受影响周边最大地表温差 ΔT) 白天/晚间小于 $4\sim 6/2\sim 3^{\circ}\text{C}$, 昼夜平均不超过 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ ^[43]; 北美 UHI 强度普遍高于欧洲^[36], 但 MODIS 卫星观测 65 个北美城市地表温度显示, 最严重的昼/夜 UHI 强度不超过 $6.5/4.5^{\circ}\text{C}$ ^[44]. 地表温度变化快、储热少、散热快, UHI 强度代表最大温差, 而相比之下水库昼夜温度稳定、

主要以蒸发散热,相同温差的 UHI 散热远低于水库超温散热. 三峡这样大型水库冬季散热或已是当今最大的人造热源.

三峡库区冬季湿润、低热,受地形和上空水汽严重覆盖,热扩散困难. 大幅度水库超温不但降低水域环境,其附加散热量对区域更具有“暖气效应”. 三峡水库蓄水以来(2004—2016年)库区平均降水比1993—2002年减少4.7 mm(根据库区25个气象站逐日资料),而由宜昌出库和朱沱、北碚和武隆入库逐日流量计算区间产水量减少100.8亿 m^3 ,产水减少显著超过降水减少. 这些年宜昌径流比多年平均值4510亿 m^3 减少11%,三峡区间减少是最大贡献者之一.

已有变化是否与上游水库附加增热相关是值得高度重视的问题. 长江从西南干热河谷流向低热阴冷四川盆地边缘和荆湘平原,巨型水库群造成热污染严重和尺度巨大的聚叠滞热效应. 同时,三峡大坝在百万平方公里流域和1.6亿人口之下、承受着巨大环境负荷,而水库环境条件又关系到下游2亿多人口的生产生活,长江的重要性、处境和被寄予的期待举世大河罕见. 但是,我国水利工程规划除一些通常环评外,对大型水库群温热效应基本不考虑;学术研究对干热河谷水库群影响下游大型水库环境等也没有系统认识. 在全球变暖大背景下,自然水域升温已受到普遍关注. 三峡等水库人为大幅度抬高水温,无论从环境影响程度还是重要性等方面看都是当前长江生态环境面临的主要问题之一. 对长江水库产生的巨大附加散热量的生态环境作用应该展开更全面和深入研究.

3 长江上游水库温热效应的修复途径

减小水库对下游热影响一般是在大坝设置高低孔口选择性取水. 三峡水库掺混强烈、不分层全水深同步储热,蓄泄调度调控温度需巨大改变水量过程、大幅度影响综合效益. 对此迄今尚无有效办法. 为抑制上游水库进一步抬高三峡水温和保护水质,本文提出利用干热河谷水库(可含嘉陵江上游和乌江等一些不通航梯级)水面,整合梯级巨大的储能和调节资源大规模发展水面光伏(PPV),同时减少三峡热量. 阻挡短波辐射抑制水库聚热和水温升高定性作用明确. 干热河谷冬春晴空为主,大气向下长波辐射较小,水体热源主要来自太阳短波,光伏(PV)板在理论上可阻挡96%的短波热能,即使考虑到不全面覆盖和散射等,完全可以减少绝大部分短波热量进入水体. 另一方面,干热河谷3—4月日均气温为21~26 $^{\circ}\text{C}$,PV覆盖后,金沙江水库加热再进入三峡的水温仍然高于4—5月寸滩和宜昌水温,春末三峡下泄低温水的情景至少不会加剧. PPV发展的定量效果评估十分复杂,最直接的办法是进行局部原型试验和实践探索,走从少到多的渐进发展路径. 下面重点讨论与PPV发展相关的关键问题.

3.1 长江上游 PPV 资源优势和发展瓶颈

我国西南 PV 资源是全球亚热带最大区域之一,年水平辐射 $\text{GHI} > 1500 \text{ kWh}/\text{m}^2$ 范围超百万平方公里(图1). 同时,这里水电资源和水库群全球最大和最密集. 长江流域综合规划^[30]上游干流向家坝、大渡河、嘉陵江亭子口和乌江渡坝上无大型航道,这里具备利用梯级水库发展 PPV 的条件.

我国 PV 产能全球最大,近年国际 PV 材料进步巨大. 当前单晶硅实用转换效率已达 21%,实验室效率 25.6%. 预期 2030 年美国可将 PV 全周期成本降低到 0.03 \$/kWh,沙特和阿联酋等因土地成本等优势实际电厂已接近此水平^[45],最新异质硅板效率超过 26%^[46]. 2030 年国产 PV 板应该能达到这一水平,PPV 完全可以摆脱财政补贴. 按上述实验室 PV 效率 25.6% 作 2030 年水平,根据干热河谷地区平均倾斜辐射强度(GTI)概算 1000 km^2 (按 0.75 面积系数)PPV 当前和 2030 年可发电 2670 和 3260 亿 kWh/a,相当于 3.1~3.9 个三峡设计电量. 三峡水库淹没 1080 km^2 、年发电量 840 亿 kW,按占地发电效率(每 km^2 电量),西南 PPV 能量密度已远超三峡. 除水面外,西南(含藏区)高辐射区荒山荒坡很多,通过 PPV 建立规模后,陆面 PV 发展几乎没有上限. 发展 PPV 并进一步促进更多可再生电力发展应该是我国能源集约和可持续的发展方向,更是水电行业发展方向.

我国当前电力供给侧结构性困难很大. 总量巨大、火电为主、峰荷集中和调节困难是主要原因. 根据南方电网平均负荷标么曲线(出力/最大出力)推算,我国全网至少需要 2.4 亿 kW 调节容量,年调节电量 1.1 万亿 kWh(占用电量 19%). 目前全国抽水蓄能装机仅 2300 万 kW,燃气电站可参与调节但规模不大,水电没有主要作为调节电源,电网调峰主要依靠火电,风光水电的环境优势降低、弃能严重. 电网依靠煤电调节也

是大气污染的重要原因之一. 并网困难是当前清洁电力的发展瓶颈.

发展 PPV 高效利用西南梯级水电是破解上述瓶颈和大幅提高清洁电力最现实和技术最成熟的途径. 水电储能巨大、调节灵敏, 梯级水库反调节优势巨大. 比如, 将 9 亿 m^3 调节库容的向家坝梯级定位为反调节电站, 则金沙江下游所有大型水电全面参与调峰调能都可得到反调节, 水富-重庆河段不会出现超标水力波动^[47]. 而且, 上游水库之间和干热河谷之外梯级水电也可参加调节. 2030 年仅西南地区金沙江、雅砻江、长江上游(含清江)、澜沧江、大渡河(岷江)、乌江、红水河(南盘江)、嘉陵江、汉江等九大梯级(图 1)装机 1.98 亿 kW、设计发电量 8940 亿 kWh. 将西南水电从基本能源向结构能源转变, 其调节规模超过任何抽水蓄能等调节电源. 此外, 西南 PV 集中在电网负荷高峰 8:00—19:00, GTI 在枯水期更强(图 8), 这是电网和水电的最大短板, PPV 补偿优势明显.

3.2 长江上游 PPV 的宏观规模与调节能力

长江上游、澜沧江、红水河、乌江和嘉陵江上游高辐射区梯级水库 2032 km^2 都有开发 PPV 的可能性; 含三峡在内, 西南几乎所有梯级水电绝大部分装机都可用于调节(不同梯级可相应承担时、日和连续阴天多日调节); 以调节定位后, 西南梯级原设计装机还可大量增加用于调节和洪水发电. 假设水电正常发电与“调峰调能”发电量不变(设计电量近似代表储能规模)和全网 2.5 亿 kW(西南水电承担 1.8 亿 kW)调节容量, 按干热河谷 1280 km^2 水面(0.75 面积系数和 25.6% 转换效率)、实测多年平均 GTI 强度、南方电网 2014 年逐月平均辐照曲线和全网电力规模(最大日负荷为 8 亿 kW, 年电量为 5.88 万亿 kWh/a)等条件, 初步概算了 PPV 发电和调节宏观规模(图 9).

上述规模 PV 可生产电量 4439 亿 kWh/a, 都集中在电网负荷高峰段. 为最大限度水电调峰和减少弃光, 逐月降低非汛期全网基荷(图 9)使弃光电量降低到 98 亿 kWh/a(2.2%). PPV 充分并网后, 调节电量需求大幅减小, 剩余 8610 亿 kWh/a 峰电完全可靠 2030 年水电储能规模消化. PPV 可维持全网基荷逐月不变, 年最大调节容量不超过 2.5 亿 kW(汛期 1.7 亿 kW). 在全网 5.88 万亿 kWh/a 电量中, 水电调峰 0.86 万亿 kWh/a, PPV 联合调峰 1.3 万亿 kWh/a(占全网电量 22.1%). 水光互补既满足了全网负荷调节需求(大幅减少火电调峰), 又增加了清洁电量并维持电网平稳. 长江上游之外其他梯级水库(如澜沧江和红水河上游等)也可建 PPV, 光伏电量更大, 但弃光比例也会增加, 减少弃光需要更大规模储能能力.

支撑上述 PPV 发展需调节容量和电量两个基本条件. 2.5 亿 kW 调节容量(夏季 1.7 亿 kW)可由西南水电和全网其他调节提供, 有两个方案. 一是水电提供 1.8 亿 kW、其他调节承担剩余 0.7 亿 kW; 二是在西南各水电枢纽全面扩大装机后承担 2.2 亿 kW 容量, 剩余 0.3 亿 kW 由其他调节承担. 2030 年西南九大梯级水电装机 1.98 亿 kW(余 0.2 亿 kW 作葛洲坝等反调节枢纽航运基荷等)、抽水蓄能 0.3 亿 kW, 油气等火电承担其余 0.4 亿 kW, 方案 1 应该可行. 我国水轮机产能巨大但市场呈下降趋势, 可利用剩余产能帮西南水电扩机. 迄今, 水电装机设计主要依据发电利用小时数. 机组成本降低和按调节定位后, 既增加调节容量又增加汛期发电, 利用小时数降低更合理. 扩机只需增加地下洞室, 一般枢纽都有条件, 几乎没有环境影响. 而且, 待建工程还可简化枢纽布局、节约造价(峡谷地区高坝枢纽消能防冲设施占大量空间, 是最贵设施之一, 扩机后泄洪设施规模可减免). 因此, 扩机后完全免除火电调峰的方案 2 也可行. 至于电量, 2030 年西南九大梯级设计电量为 8940 亿 kWh/a(不含小水电), 储能完全满足上述调节电量要求(8600 亿 kWh/a).

3.3 PPV 的其他相关问题

西南 PPV 能源和环保效益巨大, 是集约发展方向, 但也会有很多具体问题要在实际过程中出现和解决. 这里简要讨论电力传输、环境影响和后期增加储能潜力等问题.

3.3.1 特高压远距离传输 我国已具备支撑远距离传输先进技术. “十二五”期间在建与在建特高压线路 3.7 万 km, 变电电容超过 2.5 亿 kVA, 已链接西南(溪洛渡等)和华东等负荷中心; “十三五”加快特高压骨干网建设, 输电网络将基本形成^[48]. 500 km 以上传输采用 ± 800 kV 以上直流或交流特高压和超高压更经济, 适用范围为 1100~2400 km^[49]. 西南梯级水电(宜宾)与各大负荷中心距离都在 1500~2000 km 以内(图 1). 依靠特高压, 西南 PPV 出力可经济送出并网. 而且, 还可在电源侧发展远距离“光伏抽水蓄能”, 为进一步扩大西南 PPV 规模增加储能调节设施. 以西南 PPV 巨大电源和特高压建立东西能源通道, 是大幅提高我国清洁电力比例最现实的发展方向.

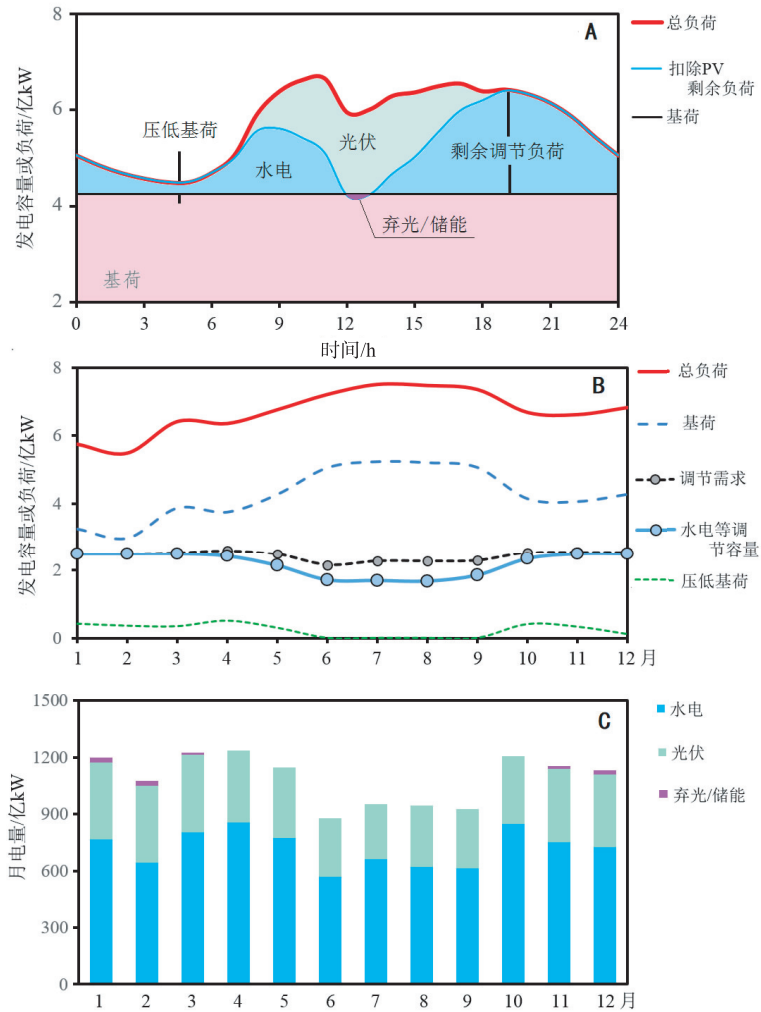


图9 干热河谷地区 1280 km²水库 PPV 与梯级水电等联合“调峰调能”电量和调节规模概算结果 (A:全网全年平均日负荷和调节情况;B:逐月平均全网负荷、调节容量需求、基荷和水电等实际参与调节容量; C:逐月 PV 和水电等消化波动电量及弃光。其中电力负荷按全国电网规模(最大日负荷为 8.0 亿 kW, 全网年电量为 5.88 万亿 kWh/a),根据南方电网 2014 年逐月平均标幺负荷曲线;水库装 PV 的面积系数为 0.75、光电转换系数为 25.6%,调节容量 2.5 亿 kW(水电为 1.8 亿 kW、抽水蓄能和其他为 0.7 亿 kW),其中逐月基荷不变)

Fig.9 Estimated output and regulating capacity of power from the 1280 km² PPV+cascade hydro-powers in the hot-valleys

3.3.2 环境等问题 PPV 的环境作用包括正反方面。首先,这一设想主要是抑制上游梯级水库群对三峡及周边环境影响。目前三峡水库冬季已严重超温,2014 年在三峡水库近坝段已出现大范围缺氧^[29];2030 年上游规划梯级水库都蓄水后将进一步增加吸热 2.04 万亿 kWh/a、冬季附加吸热强度为 1.98 亿 kW,减少上游水库对三峡水库累赘的附加散热量需要 PPV。在这方面,PPV 的定量作用还需进一步研究,但定性作用完全可以肯定。其次,PPV 对当地和水库环境影响需要密切关注和全面评价。设想的 PPV 采用图 10A 所示标准框架结构,不占地、不需基础和分散储能设备,与水电共用传输设施;它比地面 PV 节约土地和材料,建设成本更低;除遮挡短波辐射外,结构完全透水、气、光、热外,还可增加水库水面紊动和复氧(风扰动通过框架传到水下)。而且,由于水面交通优势可实现 PV 设施制造、安装、维护和报废工厂化,最大限度降低全周期环境影

响. 在全球变暖条件下,减少水体吸热总体上对环境更有利;从更大范围看,我国火电及调峰对大气环境影响很大,以更多清洁电力改善电力结构也利于东部大气环境改善. PPV 将是一个渐进可逆过程,很多具体问题都可在发展过程中改进和调整.

3.3.3 扩大储能余地等 扩大储能是更多发展 PPV 的关键. 当前储能技术进步迅速,2030 年定会有更大突破. 但是,目前最现实大规模增加储能的途径是在 PPV 基础上鼓励干热河谷水库周边因地制宜利用荒坡和山谷发展“PV 抽水蓄能”——利用多余光电抽水 and 帮电网削峰. PV 抽水蓄能只需上池、不需域外输电,调节效率远大于 100%,它还可利用高位水池兼济当地灌溉供水促进热带特色农业等发展(图 10B). PV 抽水蓄能比城市周边传统抽水蓄能经济、高效、环保和具综合优势. 攀枝花等干热河谷地区环境、气候和空间优势明显但工程性缺水,近便的电和水可激发巨大发展潜力,让群众成为清洁能源的利益相关者、得到实实在在的益处. 这种储能可进一步促进 PV 开发. 除长江流域干热河谷外,澜沧江和南盘江等还有约 750 km²库面. “PV 抽水蓄能”再增加 0.3 亿 kW 以上调节容量吸纳弃光后,西南 2032 km²的 PPV 合计可向全网提供 1.68 万亿 kWh 平稳电量(PV 占 0.679 万亿 kWh)(类似图 9 结果),不但消纳全网峰荷,而且压低基荷电量为 0.58 万亿 kWh. 西南高辐射区 PV 资源几乎没有上限,再结合其他物理、化学、新材料储能技术和用电侧优化,我国可再生清洁电力具有远大的发展空间.

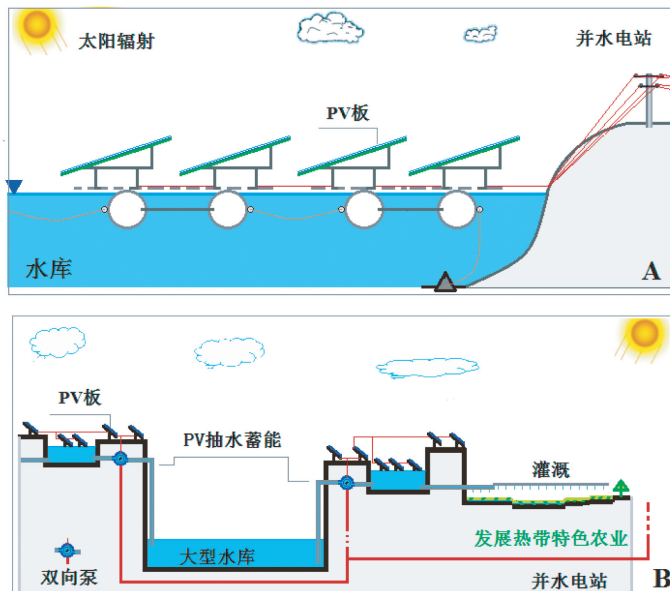


图 10 水面光伏(PPV)结构(A)和进一步扩大储能和促进干热河谷地区发展(B)设想
(建议采用移动 PVC 浮筒框架的标准结构, PV 板离开水面; PV 出力与水电调节调度、
加压后统一上网; PV 抽水蓄能可在大型水库周边河谷因地制宜布局(地方建管),
不需下池和供电设施并且与扩大当地农业灌溉用水和特色农业发展结合起来)

Fig.10 Envisaging PPV structure (A) and its further extension scheme in promoting I° Cal developments in the region (B)

4 结论和展望

1) 三峡水库蓄水后产生了较大热效应. 库区和下泄水温春末降低、秋冬和初春升高、过程滞后,变化程度随库水位和上游水库增加而增加. 金沙江下游溪洛渡、向家坝和嘉陵江亭子口等水库蓄水后,三峡入库水温进一步升高,宜昌冬季水温比天然最大抬高 5.32℃、汉口 3.63℃,初夏宜昌和汉口最多降低 3.5 和 1.58℃,滞后 30~43 天,范围超过汉口. 从高辐射干热河谷流向低温低热的四川盆地边缘和荆湘平原,这种情景世界大河罕见,大型水库改变水温(特别是最下游三峡)尤其严重. 目前,三峡库区和下游冬季水温平均高出气温

10℃(最高 13℃);更多上游水库蓄水后预期超温还将增加。

2) 三峡水温升高的环境影响和其他潜在效应尺度巨大,热污染已成为当前长江生态环境的主要问题之一。库区和下游每年 10—2 月因高水温降低饱和溶解氧程度已与长江污染(化学需氧量计)相同数量级,而且高温刺激水库污染等耗氧,影响程度更大。11—1 月三峡库区平均释放附加散热量功率为 2.43 亿 kW、在天然基础上向中游增加输入潜在热量功率为 1.73 亿 kW。预计 2030 年上游干热河谷规划水库群全面蓄水后,冬季还将增加 2 亿 kW 附加吸热功率和热量为 2 万亿 kWh/a,这些热会大量进入三峡水库,水温还会进一步升高。冬季水库巨大增热对阴冷潮湿的三峡库区和周边环境、水资源、春季土壤墒情和局部气候影响还不清楚、需认真研究。

3) 与其他水库滞温效应不同,三峡库容大、流量大、承受污染负荷大,水库基本不分层和上下水温几乎一样、热量巨大,同时水温大幅超过气温。相同水温变化所关联水热规模和环境作用远超其他水库,热水对库底污染分解、生物耗氧和深层水缺氧诱发作用大,调度调控与综合效益矛盾很大,缓解热效应和环境影响可选措施(如选择性取水等)少,抑制温度升高和修复热污染(特别是高温干旱年份或上游水库进一步大量增热后)十分困难。

4) 本研究表明,大规模利用上游干热河谷光伏资源和密集梯级水电优势发展水面光伏,既消除强辐射增热,也可带来清洁电力。这是一个能源和环境同优的集约发展途径,建议开展系统研究、试点和试范。

5) 西南水面光伏可高效利用当地水库和水电群的储能、调节和空间优势,整合光、水和电网负荷间的补偿优势高效发挥我国业已形成规模的特高压输电优势、大幅度改善电力供给和电力结构。初步研究显示,利用规划 2030 年干热河谷水库群,按结构电力转变梯级水电定位促光伏发展,可提供清洁电力 1.3 万亿 kWh(占全网电量 22.1%),可基本消纳全网峰电并相当幅度压低基荷。更多储能方式和技术应用后,这一规模还可大幅度增加。

西南地区光伏资源几乎没有上限,发展空间巨大。地处长江上游滇藏川黔和横断山区都是欠发展地区,受长江保护约束,在不搞大开发条件下发展方式必须科学选择。集约发展水光互补电力、建立东西间大规模能源通道,建设我国最大规模可再生清洁电力基地,不但对整体能源和环境具有重大意义,而且也是促进区域发展的合理选择。这里气候、光热、自然环境、空间和劳动力等资源非常丰富,水多但严重工程性缺水,电力是制约地区发展的关键。水光互补发展基础上,积极鼓励当地利用荒坡和山沟因地制宜发展“PV 抽水蓄能”,并用其上池兼作灌溉水源建立水资源保障体系,不但可为当地带来巨大经济来源和激活特色农业等更多发展业态帮助群众致富,而且这种蓄能调节设施技术可靠、简便和可分布式规模发展,也是今后西南地区更大规模开发可再生电力和持续发展的关键。这种发展完全符合长江经济带和国家生态文明建设“生态优先、绿色发展”的要求。

5 参考文献

- [1] Zhou JJ, Zhang M. On the forefront ecological and environmental problems of current Yangtze River and restoration priorities. *Environmental Protection*, 2017, **617**(45): 17-24. [周建军, 张曼. 当前长江生态环境主要问题与修复重点. 环境保护, 2017, **617**(45): 17-24.]
- [2] Zhou XD, Song C, Tang W. Cumulative effects of cascade reservoirs on water temperature from Longyang Gorge to Liujia Gorge in the Yellow River Upstream. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2012, **28**(1): 1-6. [周孝德, 宋策, 唐旺. 黄河上游龙羊峡—刘家峡河段梯级水库群水温累积影响研究. 西安理工大学学报, 2012, **28**(1): 1-6.]
- [3] Xue LF, Gu HB, Cui L *et al.* Study on cumulative effects to water temperature caused by the hydropower cascade development in Hongshui River. *Water Power*, 2010, **36**(11): 5-8 [薛联芳, 顾洪宾, 崔磊等. 红水河干流梯级开发对水温累积影响的调查研究. 水力发电, 2010, **36**(11): 5-8.]
- [4] Huang F, Wei L, Li L *et al.* Cumulative effects of water temperature by cascade hydropower stations built on upper and middle reaches of the Wujiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(4): 337-342. [黄峰, 魏浪, 李磊等. 乌江干流中上游水电梯级开发水温累积效应. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(4): 337-342.]
- [5] Liu J, Yu Z. Water quality changes and effects on fish populations in the Hanjiang River, China, following hydroelectric dam construction. *Regulated Rivers, Research and Management*, 1992, **7**: 359-368.
- [6] Zhong Y, Power G. Environmental impacts of hydroelectric projects on fish resources in China. *Regulated Rivers: Research*

- and Management, 1996, **12**: 81-98.
- [7] Olden JD, Naiman RJ. Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments; modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biology*, 2010, **55**: 86-107.
- [8] Webb BW, Walling DE. Long-term variability in the thermal impact of river impoundment and regulation. *Applied Geography*, 1996, **16**: 211-223.
- [9] Preece RM, Jones HA. The effect of Keepit Dam on the temperature regime of the Namoi River, Australia. *River Research and Applications*, 2002, **18**: 397-414.
- [10] Cao GJ, Hui EQ, Hu XE. Analysis of the vertical structure of water temperature in the vicinity area of Three Gorges Dam since the Three Gorges Reservoir impounds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, **43**(10): 1254-1259. [曹广晶, 惠二青, 胡兴娥. 三峡水库蓄水以来近坝区水温垂向结构分析. 水利学报, 2012, **43**(10): 1254-1259.]
- [11] Zhang HL. Post project environment impact assessment research on the water temperature simulation of Liujiaxia Reservoir [Dissertation]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. [张华丽. 刘家峡水库水温影响回顾评价研究 [学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2008.]
- [12] Guo WX, Wang HX, Xia ZQ *et al.* Effects of Three Gorges and Gezhouba reservoirs on river water temperature regimes. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2009, **28**(6): 182-187. [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. 水力发电学报, 2009, **28**(6): 182-187.]
- [13] Maidment DR ed. Handbook of hydrology. New York: McGraw-Hill Inc, 1993.
- [14] Stanford JA, Ward JV, Liss WJ *et al.* A general protocol for restoration of regulated rivers". US Dep. of Energy Publications, 1996: 43. [Http://digitalcommons.unl.edu/usdoepub/43](http://digitalcommons.unl.edu/usdoepub/43).
- [15] Ward JV, Tockner K, Uejlinger U *et al.* Understanding natural patterns and processes in river corridors as the basis for effective river restoration. *Regul Rivers Res*, 2001, **17**: 311-323.
- [16] Murchie KJ, Hair KPE, Pullen CE *et al.* Fish response to modified flow regimes in regulated rivers: research methods, effects and opportunities. *River Research and Applications*, 2008, **24**: 197-217.
- [17] Haxton TJ, Findlay CS. Meta-analysis of the impacts of water management on aquatic communities. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2008, **65**: 437-447.
- [18] Zhang YL. Effect of climate warming on lake thermal and dissolved oxygen stratifications; A review. *Advances in Water Science*, 2015, **26**(1): 130-139. [张运林. 气候变暖对湖泊热力及溶解氧分层影响研究进展. 水科学进展, 2015, **26**(1): 130-139.]
- [19] Gerten D, Lucht W, Ostberg S *et al.* Asynchronous exposure to global warming; freshwater resources and terrestrial ecosystems. *Environ Res Lett*, 2013, **8**(3): 1345-1346.
- [20] Chang JB, Chen YB, Gao Y *et al.* Impact of dams on fishing and mitigation measures// Department of Environmental Impact Assessment, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China ed. Research and practice on ecology and environment protection of water resources and hydropower development project. Beijing: China Environmental Science Press, 2006: 239-253. [常剑波, 陈永柏, 高勇等. 水利水电工程对鱼类的影响及减缓对策// 国家环境保护总局环境影响评价管理司主编. 水利水电开发项目生态环境保护研究与实践. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 239-253.]
- [21] Chen DQ, Chang JB, Gu HB. Impacts of Jinsha River first stage project on ecology and environment of nature reserve and its countermeasures. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2005, **22**(2): 21-24. [陈大庆, 常剑波, 顾宏宾. 金沙江一期工程对保护区生态环境的影响与对策. 长江科学院院报, 2005, **22**(2): 21-24.]
- [22] Ligon FK, William ED, William JT. Downstream ecological effects of dams. *Bioscience*, 1995, **45**(3): 183-192.
- [23] Diaz RJ. Overview of hypoxia around the world. *J of Environmental Quality*, 2001, **30**: 275-281.
- [24] Schneider P, Hook SJ. Space observations of inland water bodies show rapid surface warming since 1985. *Geophy Res Lett*, 2010, **37**: L22405. DOI: 10.1029/2010GL045059.
- [25] Gameson ALH, Robertson KG. The solubility of oxygen in pure and sea-water. *J Appl Chem*, 1955, **5**(9): 502.
- [26] Li GS, Gao QH, Zhang XY. Analysis on the DO variation upstream and downstream of Three Gorges reservoir before and after its impoundment. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2016, **37**(11): 3-5. [李贵生, 高千红, 张馨月. 三峡水库蓄水前后上下游溶解氧变化分析. 水利水电快报, 2016, **37**(11): 3-5.]
- [27] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Bulletin on environmental conditions in China, 2016. <http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb>. [中华人民共和国环境保护部. 中国环境状况公报(2007—2015), 2016.]
- [28] Qiao F, Meng W, Zheng BH *et al.* Pollution load accounting and source analysis at Cuntan Section in main stream of Yan-

- gtze River. *Research of Environmental Sciences*, 2010, **23**(8): 979-986. [乔飞, 孟伟, 郑丙辉等. 长江干流寸滩断面污染负荷核算及来源分析. 环境科学研究, 2010, **23**(8): 979-986.]
- [29] Zhou JJ, Zhang M, Li Z. Dams altered Yangtze River phosphorus and restoration countermeasures. *J Lake Sci*, 2018, **30**(4): 865-880. DOI: 10.18307/2018.0401. [周建军, 张曼, 李哲. 长江上游水库改变干流磷通量、效应与修复对策, 湖泊科学, 2018, **30**(4): 865-880.]
- [30] Changjiang Water Resources Commission ed. Integrated planning of the Yangtze valley (2012-2030), 2013-01-04. http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/201702/t20170212_842973.html. [水利部长江水利委员会. 长江流域综合规划(2012-2030年), 2013-01-04.]
- [31] State Oceanic Administration, People's Republic of China ed. Bulletin of China marine environmental status, 2013. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/gjhyjgb/201508/t20150818_39517.html. [国家海洋局. 中国海洋环境状况公报, 2013.]
- [32] Penman HL. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London: Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1948, **193**(1032): 120-145.
- [33] Brock BW, Arnold NS. A spreadsheet-based (Microsoft Excel) point surface energy balance model for glacier and snow melt studies. *Earth Surf Process Landforms*, 2000, **25**: 649-658.
- [34] Cheng BY, Sun WG, Sun SQ *et al.* Study on the climatological calculation methods of total solar radiation in Chongqing area. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2011, **33**(9): 94-104. [程炳岩, 孙卫国, 孙仕强等. 重庆地区太阳总辐射的气候学计算方法研究. 西南大学学报: 自然科学版, 2011, **33**(9): 94-104.]
- [35] Arnfield AJ. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int J Climatol*, 2003, **23**: 1-26.
- [36] Oke TR. The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*, 1988, **12**: 471-508.
- [37] Patz JA, Campbell-Lendrum D, Holloway T *et al.* Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 2005, **438**(7066): 310-317.
- [38] McMichael AJ, Woodruff RE, Hales S. Climate change and human health: Present and future risks. *The Lancet*, 2006, **367**(9513): 859-869.
- [39] Cardelino CA, Chameides WL. Natural hydrocarbons, urbanization, and urban ozone. *Journal of Geophysical Res: Atmospheres*, 1990, **95**(D9): 13971-13979.
- [40] Sarrat C, Lemonsu A, Masson V *et al.* Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(10): 1743-1758.
- [41] Ryu YH, Baik J, Lee SH. Effects of anthropogenic heat on ozone air quality in a megacity. *Atmospheric Environment*, 2013, **80**: 20-30.
- [42] Babazadeh M, Kumar P. Estimate of the urban heat island in local climate change and vulnerability assessment for air quality in Delhi. *European Scientific Journal*, 2015.
- [43] Zhou D, Zhao S, Zhang L *et al.* The footprint of urban heat island effect in China. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 11160. DOI: 10.1038/srep11160.
- [44] Zhao L, Lee X, Smith R *et al.* Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 2014, **511**: 216-219.
- [45] Chu S, Cui Y, Liu N. The path towards sustainable energy. *Nature Materials*, 2017, **16**(1): 16-22.
- [46] Yoshikawa K, Kawasaki H, Yoshida W *et al.* Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photo-conversion efficiency over 26%. *Nature Energy*, 2017, **2**: 17032. DOI: 10.1038/nenergy.2017.32. www.nature.com/nature-reenergy.
- [47] Tang X, Zhou J. A future role for cascade hydropower in the electricity system of China. *Energy Policy*, 2012, **51**(4): 358-363.
- [48] Han F, Song FL, Luo JS *et al.* Research on development of transmission power grid in 13th Five-Year Period. *Electric Power*, 2015, **4**(1): 11-14. [韩丰, 宋福龙, 罗金山等. “十三五输电发展重点研究”, 中国电力, 2015, **4**(1): 11-14.]
- [49] Liu ZY, Zhang QP. Study on the development mode of national power grid of China. *Proceedings of the CSEE*, 2013, **33**(7): 1-10. [刘振亚, 张启平. 国家电网发展模式研究. 中国电机工程学报, 2013, **33**(7): 1-10.]