

## 模拟分析揭示三峡水库成库以来的气候效应:局地和近地层,而不是区域\*

艾泽<sup>1,2,3</sup>, 常蕊<sup>1,2\*\*</sup>, 肖潺<sup>2</sup>, 陈鲜艳<sup>1,2</sup>, 张强<sup>2</sup>, 李威<sup>2</sup>, 李帅<sup>1</sup>, 龚文婷<sup>1</sup>

(1: 中国长江三峡集团有限公司, 武汉 430010)

(2: 国家气候中心, 北京 100081)

(3: 湖北省气象服务中心, 武汉 430205)

**摘要:** 针对以往三峡水库气候效应数值模拟研究中, 水库参数化方案简约及模拟时段未涉及成库以来高水位运行阶段等不足, 在中尺度气象模式中, 通过拓宽水体面积和抬升水位高度的方式对三峡水库引起的陆面参数变化进行描述, 进而采用敏感性数值试验及统计分析等手段, 评估了三峡水库成库以来高温干旱(2013年)和低温洪涝(2020年)年景下, 关键气象要素对水库运行的响应特征。结果表明: 两种典型年景下水库运行均会造成近地层气温降低(0.98~1.27℃)、相对湿度增加(3.9%~5.5%)和风速增大(0.43~0.68 m/s), 同时响应强度的日变化导致近地层气温和相对湿度的日较差减小、平均风速的日较差增大; 尽管上述变量的变化幅度与该地区气候的自然变率相当, 但水库运行对气温和相对湿度的影响范围基本限制于水库周边约2 km, 垂直方向则大多低于200 m, 对风速的影响范围可扩展至水库周边约12 km, 垂直方向延伸至200 m左右, 且响应强度均随水平距离和垂直高度的增加而显著减小。尽管数值试验放大了三峡水库的气候效应, 但作为典型的河道型水库, 三峡水库成库以来的不同气候年景下, 水库运行产生的气候效应基本限制在近地层、局地范围内, 未对区域气候产生明显影响。

**关键词:** 三峡水库; 成库以来; 气候效应; 数值模拟

## Simulated climate effect of the Three Gorges Reservoir after its completion: Within surface and local scope instead of regional\*

Ai Ze<sup>1,2,3</sup>, Chang Rui<sup>1,2\*\*</sup>, Xiao Chan<sup>2</sup>, Chen Xianyan<sup>1,2</sup>, Zhang Qiang<sup>2</sup>, Li Wei<sup>2</sup>, Li Shuai<sup>1</sup> & Gong Wenting<sup>1</sup>

(1: *China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, P.R.China*)

(2: *National Climate Centre of CMA, Beijing 100081, P.R.China*)

(3: *Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205, P.R.China*)

**Abstract:** In view of the shortcomings of the previous numerical simulation research on the climate effect of the Three Gorges Reservoir (TGR), such as the simplicity of the reservoir parameterization and the fact that the simulation period did not involve the reservoir impoundment period, the changes of land surface parameters induced by the TGR were numerically described by increasing the river width and raising the water level in the mesoscale meteorological model. The variation characteristics of meteorological elements after completion of the TGR were analyzed based on two parallel numerical simulations, control run (no TGR) and sensitive run (TGR), during the drought year with high temperature (2013) and the flood year with low temperature (2020). The results show that the operation of TGR under these two typical years both reduce the surface temperature (0.98–1.27°C), increase the relative humidity (3.9%–5.5%) and the wind speed (0.43–0.68 m/s), the diurnal range of near-surface temperature/relative humidity decreases and the diurnal range of wind speed increases with the diurnal variation of the response; Although the aforementioned responses are equivalent to the natural climate variability, the variations of temperature and relative humidity are basically

\* 2022-06-14 收稿; 2022-09-27 收修改稿。

中国长江三峡集团有限公司项目(0704182)和国家自然科学基金基础科学中心项目(72088101)联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: changrui@ema.gov.cn。

limited to about 2 km around the reservoir, most of which are lower than 200 m in the vertical direction, and the variation of wind speed change extend to about 12 km near the reservoir with up to 200 m in the vertical direction. All of these responses decrease significantly with the increase of horizontal distance and vertical height. Therefore, although the climate effect of the TGR is amplified in our simulation experiment, as a typical river-type reservoir, the climate effect induced by the operation of TGR is basically limited to the surface and local area, and has no obvious influence on the regional climate.

**Keywords:** Three Gorges Reservoir; completion of the reservoir; climate effect; numerical simulation

三峡库区位于长江上游,西起重庆江津区,东至湖北宜昌市,全长约 600 km,水面平均宽度 1.1 km,其中淹没陆地面积大约 600 km<sup>2</sup>。库区地处特殊的山地气候区,如何在湖泊效应与山地气候相结合的复杂背景下,科学动态评估三峡水库运行的气候影响,成为水库增效基础上保持环境友好的关键。

受限于三峡库区实测资料的时空代表性问题,数值模拟方法成为三峡水库气候影响研究的主要技术手段。张洪涛等<sup>[1]</sup>设计了三维大气-土壤耦合边界层模式对三峡三斗坪地区小气候状况进行模拟,结果发现风、温、湿气象要素场在离岸近十千米范围内均发生了改变,这种改变发生的范围夏季比冬季大。Miller 等<sup>[2]</sup>使用 MM5 中尺度模式对 1990 年 3 月 2 日-5 月 16 日中的无雨日进行模拟,结果发现三峡水库的蒸发会引起周边气温降低(2.9℃),对降水没有明显影响。Wu 等<sup>[3]</sup>使用 MM5 模式进行模拟发现三峡水库蓄水会造成三峡大坝附近降水略微减小,大坝以北和以西地区的降水量增多,并指出水库对降水的气候影响范围可能为区域尺度(100 km 左右)而非局地尺度(10 km 左右)。马占山等<sup>[4]</sup>使用 MM5 模式的研究发现三峡水库附近气温春季降温、冬季升温,不同季节对库区不同区域有不同影响,春季库区相对湿度增加。吴佳等<sup>[5]</sup>使用 RegCM3 区域气候模式对 2005-2006 年夏季气温和降水进行模拟,结果发现三峡水库引起的地面气温和降水变化很小。李强等<sup>[6]</sup>利用 WRF 模式的模拟试验表明三峡水体的存在为降水提供了更充分的水汽条件和不稳定能量,有降水事件下,地形和下垫面作用对局地降水和落区有重要影响;无降水事件下,长江水体在白天(夜晚)有降温(保温)作用。李艳等<sup>[7]</sup>利用 WRF 模拟三峡大坝气候效应发现,冬季日平均气温变化较小,日平均风速在长江河道附近风速增强,库区北部部分区域降水增加。王中等<sup>[8]</sup>利用 WRF 模式对 2002 年和 2005 年的两次强降水过程进行模拟,结果表明水体变化对气温没有明显影响,对水体附近的风速产生影响,对当地水汽来源有着重要影响。

尽管研究中使用的数值模拟工具从边界层模式、静力平衡区域气候模式,逐渐升级为先进的非静力平衡中尺度天气预报模式,但数值模拟试验中,主要通过修改地表覆盖类型的方式对水库进行简约粗放的参数化,未考虑狭长低谷地形下水库水位变化的影响;将无水体覆盖的情景设置为参考试验,这与长江自然水体的实际情景存在差异;积分时段单一,模拟结果的代表性有限;且仅覆盖水库成库前的阶段,缺乏水库成库以来高水位运行阶段(2012-2020 年)的气候效应评估(附表 1)。

鉴于此,本文拟通过优化三峡水库的气候效应数值参数化方案,加密模式水平网格和垂直分层、格点同化技术、重叠积分改善模式冷启动效应等数值模拟技术,评估三峡水库成库以来不同气候年景下的近地层气象要素对水库运行的响应特征,以期对三峡水库的高效管理提供技术支撑。

## 1 数据与方法

### 1.1 气象站观测数据

选择三峡水库周边 33 个气象站用于检验数值模式模拟效果,包括湖北省内 11 个和重庆市内 22 个气象站。根据《地面气象观测站气象探测环境调查评估方法》(GB/T 35219-2017)的相关规定<sup>[9]</sup>,采用百分制对上述 33 个地面气象站的探测环境进行定量评分,分值越高,代表探测环境越好(图 1)。气象站观测数据来自国家气象信息中心建设的全国综合气象信息共享平台,包括 1991-2021 年的逐小时气温、风速和相对湿度。使用 33 个气象站 1991-2021 年气象要素的标准差代表三峡地区气候的自然变率。

### 1.2 模拟驱动场数据

数值模拟的初始场和边界条件采用 0.5°×0.5°、逐 6 小时分辨率的 CFSv2 全球再分析场<sup>[10]</sup>,模拟范围内的土壤分类、土地利用、地形高度、土壤湿度、植被、反照率等静态数据来自于中尺度气象数值模式 WRF 自带的 MODIS 卫星遥感数据集。



34.6%), 8 代表多树的草原 (占比 8.4%), 4 代表落叶阔叶林 (占比 4.0%), 1 和 14 分别代表常绿针叶林及作物和自然植被的镶嵌体 (各占比 1.9%), 10 和 6 分别代表草原和郁闭灌丛 (各占比 1.3%), 13 代表城市 (占比 0.6%)。可见, 尽管中尺度 WRF 模式的最新版本中使用了 MODIS 的地形资料, 但在 2 km 水平分辨率的模拟情景下, 仍然不能真实反映长江水体的下垫面特征, D03 区域的土地利用类型中“水体”(代码 17) 占比为 0, 即不存在水体。

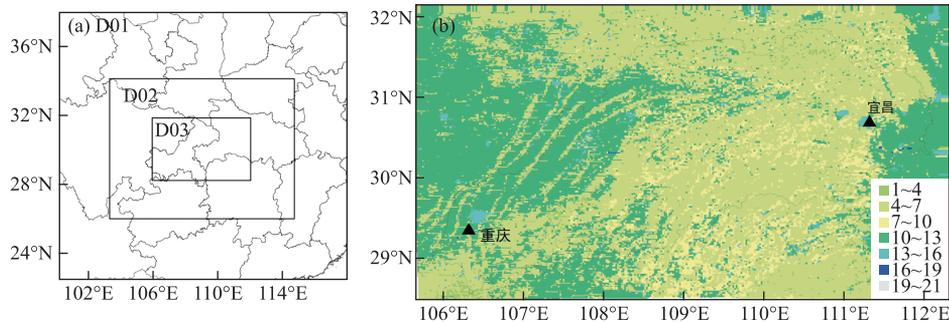


图 2 三峡库区数值模拟嵌套范围(a)及最内重嵌套范围内的土地利用类型(b)  
Fig.2 Nested domains of the simulation in Three Gorges Reservoir area (a) and the land use type over the innermost nested domain (b)

## 2.2 模式物理参数化方案

参考李艳等<sup>[7]</sup>在三峡库区气候特征模拟时的物理参数化方案组合, 并进行局部优化后, 本文的数值模拟试验所选取的主要物理过程参数化方案为: WSM5 微物理参数化方案<sup>[11]</sup>; RRTM 长波辐射参数化方案<sup>[12]</sup>; Dudhia 短波辐射参数化方案<sup>[13]</sup>; MYNN 边界层参数化方案<sup>[14]</sup>; MM5 近地层方案<sup>[15]</sup>; Noah 陆面参数化方案<sup>[16]</sup>和 Kain-Fritsch 积云参数化方案<sup>[17]</sup>, 其中积云参数化方案仅在 D01 使用。

## 2.3 模拟时段及积分方案

通过分析三峡库区 33 个气象站观测的逐年气温和降水量特征发现 (附图 I), 三峡地区 2013 年夏季 (7 月) 呈现高温干旱特征, 而 2020 年夏季 (7 月) 则表现为降水偏多气温偏低的特征<sup>[18]</sup>; 2013 年和 2020 年冬季 (1 月) 的气温降水也呈现类似特征。年平均而言, 2013 年和 2020 年分别是三峡地区高温干旱和低温洪涝的典型代表年份。

综合相关工程气候效应评估技术规范要求及上述气候年景特征, 下文将针对三峡地区, 分别开展高温干旱 (2013 年) 和低温洪涝 (2020 年) 年景下, 冬季 (1 月) 和夏季 (7 月) 的数值模拟试验, 包括参考试验和敏感性试验, 对比分析水库运行对周边气温、湿度和风速等气候要素的影响程度及范围。

为改进数值模式长时间积分过程中的不完善及误差在计算中的累积增长问题, 数值模拟积分过程中, 采用牛顿松弛逼近法对 CFSv2 再分析资料进行格点同化。在此基础上, 每 10 天冷启动一次 WRF 模式, 每次连续积分 11 天, 前一次模拟的最后 1 天与后一次模拟的第 1 天重叠; 以每次模拟结果的前 24 小时作为模式 spin-up 时间, 保留后 10 天的模拟结果; 循环启动运行 3 次, 完成整月模拟。

## 2.4 水库调节的气候效应数值参数化

由于水库的气候效应主要体现在地表下垫面由原来的陆地改为水体及水位抬升, 所带来的热力性质、辐射平衡和热量平衡等诸多方面的差异对库区及其周围的局地小气候所产生的影响。因此, 数值模拟试验中将通过调整土地利用类型、优势植被系数和地形高度等方式对三峡水库引起的陆面参数变化进行描述。

2.4.1 土地利用类型及其占比系数 参照试验中, 在 WRF 模式默认土地利用类型情景下 (图 2b), 加入长江自然水体的实际位置 (图 3a 蓝点线)。该试验中, 水面宽度设置为 1 个格点, 即 2 km。D03 模拟范围内共 292 个水体格点, 占模拟范围总格点数的 0.5% 左右。同时, 对应调整水体格点处的优势类型占比系数, 将“水体”系数设置为 100%, 其余土地利用类型的占比系数均设置为 0。

敏感性试验中, 将水体平均宽度扩宽 1 个格点, 即拓宽至 4 km, 库首区 (110° ~ 111.5° E) 和库尾区

(106.3°~107°E)分别扩宽2个格点,即拓宽至6 km(图3b)。D03模拟范围内共626个水体格点,占模拟范围总格点数的1%左右。类似地,对应调整水体格点处的优势类型占比系数,将“水体”系数设置为100%,其余土地利用类型的占比系数均设置为0。

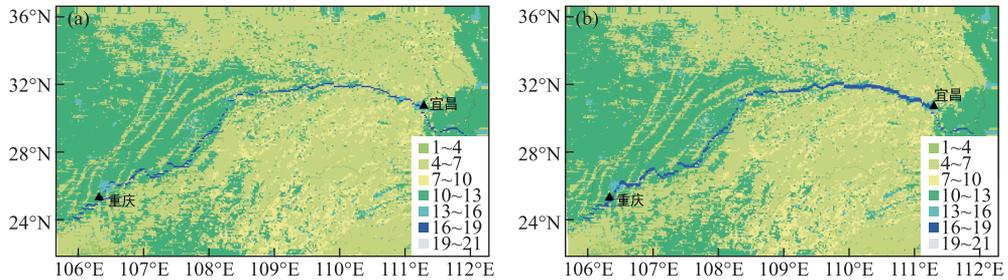


图3 参照试验(a)和敏感性试验(b)的土地利用类型(蓝点线代表水体位置)

Fig.3 Land use types in control run (a) and sensitivity run (b)  
(The blue dot lines represent the location of the water body)

2.4.2 三峡水库蓄水水位相关的地形高度参数 三峡水库建成前,平均水位高度为60 m,成库后夏季蓄水水位145 m,冬季蓄水水位175 m(图4a)。数值试验通过将水体覆盖位置处的地形高度抬升120 m的方式对水库的水位变化进行刻画(图4b)。

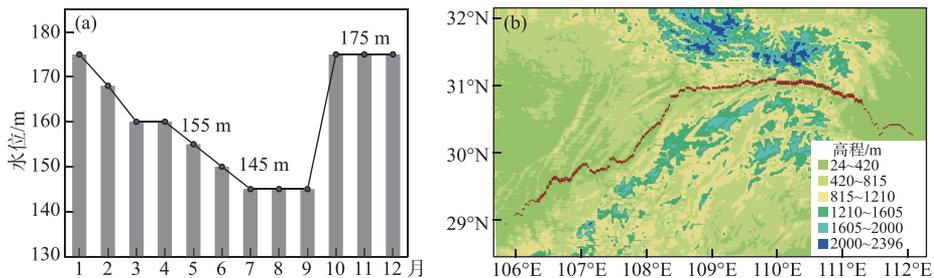


图4 三峡水库水位年变化(a)及最内重嵌套范围内的地形高度(b)(红点代表高水位水体位置)

Fig.4 Annual variation of water level in TGR (a) and the terrain height over the innermost domain (b)  
(Red dots represent the location of high water level in simulation)

总体而言,三峡水库两岸地形切割非常明显,是典型的河道型水库(图4b),其气候效应远小于圆形或椭圆形湖区水库。三峡水面平均宽度1.1 km,本文的数值试验中,假设水体宽度拓宽4~6 km,较实际增大了4~5倍,且假设水库一直在高水位运行,在一定程度上放大了水库的气候效应。

### 3 三峡水库对局地气候的影响

水库水体面积扩大,局地下垫面由陆地转变成水面,由于水体的反照率、粗糙度及辐射性质、热容量、导热率等不同于陆地,可以改变地表与大气间的动量、热量和水分交换,进而对局地小气候产生影响<sup>[5]</sup>。以下就在数值模式模拟效果检验的基础上,重点分析模式模拟的三峡水库水体面积及水位高度变化后,气温、风速和相对湿度等的时空变化特征,即三峡水库的气候效应。

#### 3.1 数值模拟效果检验

已有研究表明 WRF 模式对区域气候具有较好的模拟能力,该模式模拟的近地层气象变量,如2 m 气温、10 m 风速、短波辐射和气压等的时空变化特征与实测资料具有较高的一致性<sup>[19-20]</sup>。针对本文的研究目标与需求,进一步选择三峡地区33个地面气象站观测资料对WRF模式在该区域的模拟性能进行评估。图5给出了三峡地区2013年和2020年冬/夏季代表月(1月/7月)地面气象站观测的逐日气温、相对湿度和风速

速序列与数值模拟序列的相关系数分布图,统计分析的样本量为60。考虑气象站10 m高度风速观测资料受观测环境影响较大,风速分析中剔除了三峡地区气象站探测环境不佳的5个站点(垫江、彭水、宣恩、长阳和巫山,图1)。

1月份,三峡地区33个地面气象站气温和相对湿度的观测值与模拟值的时间相关系数大多超过0.6,部分站点甚至超过0.8,区域内所有站点均通过了95%的统计信度检验(图5a和5b)。量值上来看,数值模拟的平均气温系统性偏高约 $0.8^{\circ}\text{C}$ (附图II a),约为气候平均值的11.7%,区域内平均气温的空间相关系数接近0.9;模拟的相对湿度则呈现系统性偏低特征,区域平均的相对湿度模拟偏差为 $-7.6\%$ (附图II b),空间相关系数为0.61。中尺度数值模拟风速的空间平滑及站点观测风速易受地形环境影响的局地特征,给近地层风速的模拟检验工作带来了较大挑战。尽管如此,三峡地区超过八成台站的1月份风速模拟值与观测值的时间相关系数通过95%的统计信度检验,其中一半以上站点的相关系数超过0.5,部分台站甚至超过0.7(图5c)。与气象台站观测相比,模拟的近地层风速呈现系统性偏高特征,平均偏高约 $0.6\text{m/s}$ (附图II c),区域内平均风速的空间相关系数达0.74。

7月份,区域内所有台站的气温和相对湿度的观测值与模拟值的时间相关系数普遍超过0.6,部分站点甚至超过0.8,均通过了95%的统计信度检验(图5d和5e)。量值上来看,模拟的平均气温系统性偏高约 $0.45^{\circ}\text{C}$ (附图II d),超过80%台站的气温模拟偏差低于5%,区域内平均气温的空间相关系数达0.84;区域平均的相对湿度模拟偏差为 $-2.8\%$ (附图II e),空间相关系数为0.52;区域内超过50%台站的风速模拟值与观测值的时间相关系数通过95%的统计信度检验,部分台站相关系数超过0.6(图5f),模拟的近地层风速系统性偏高约 $0.8\text{m/s}$ (附图II f),空间相关系数超过0.83。

可见,本文所用数值模式能较好地重现三峡地区台站观测中2 m气温、相对湿度和10 m风速的时空变化特征,尽管在绝对量值上存在系统性偏差,但由于本文关注三峡水库运行前后的差值变化特征,因此,所用数值模式对近地层气候变量的模拟性能基本满足研究需求。

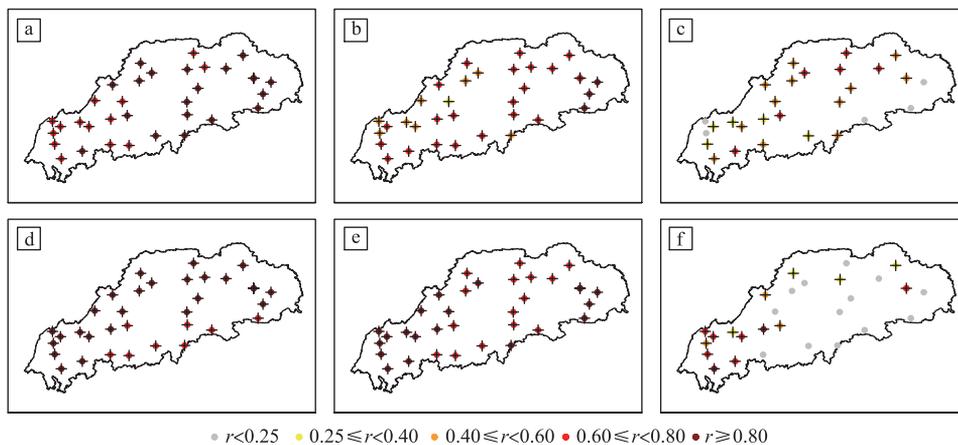


图5 三峡地区1月和7月数值模拟的逐日2 m气温(a, d)、相对湿度(b, e)和10 m风速(c, f)与气象站观测值的相关系数分布(相关系数超过95%统计信度检验的站点用黑色十字标注)

Fig.5 Correlation coefficients of daily 2 m air temperature (a, d), relative humidity (b, e) and 10 m wind speed (c, f) between simulated results and observations from meteorological stations during January and July (Stations with 95% confidence level of correlation are marked with black cross)

### 3.2 水库运行对气温的影响

图6给出了高温干旱年景(2013)与低温洪涝年景(2020)下冬、夏季敏感性试验与参照试验2 m温度差值分布图。总体而言,水库运行后,两种典型气候年景下库区水体附近的2 m气温均呈现降低特征,且降温

幅度受气候背景影响,其中高温干旱年景降温幅度大于低温洪涝年景,夏季大于冬季,气温日较差减小。夏季,高温干旱年平均减小幅度为 $1.27^{\circ}\text{C}$ ,而低温洪涝年的气温减小了约 $1.25^{\circ}\text{C}$ ;冬季库区水体位置处,高温干旱年和低温洪涝年的 $2\text{ m}$ 气温分别减小 $1.08$ 和 $0.98^{\circ}\text{C}$ ,而水库周边的陆地区域则出现增温特征,尤其在低温洪涝年的冬季更明显(图6b)。将图6中通过显著性检验的格点温度进行空间平均,得到三峡地区2013和2020年冬季(1月)、夏季代表月(7月) $2\text{ m}$ 温度日变化曲线(图7)。如图可见,两种典型气候年景下平均温度白天降温程度更明显,夜间降温弱,水库运行导致气温日较差变小。夏季降温程度更明显,14:00降温最明显<sup>[21]</sup>,为 $3.0^{\circ}\text{C}$ ,20:00降温程度最弱。

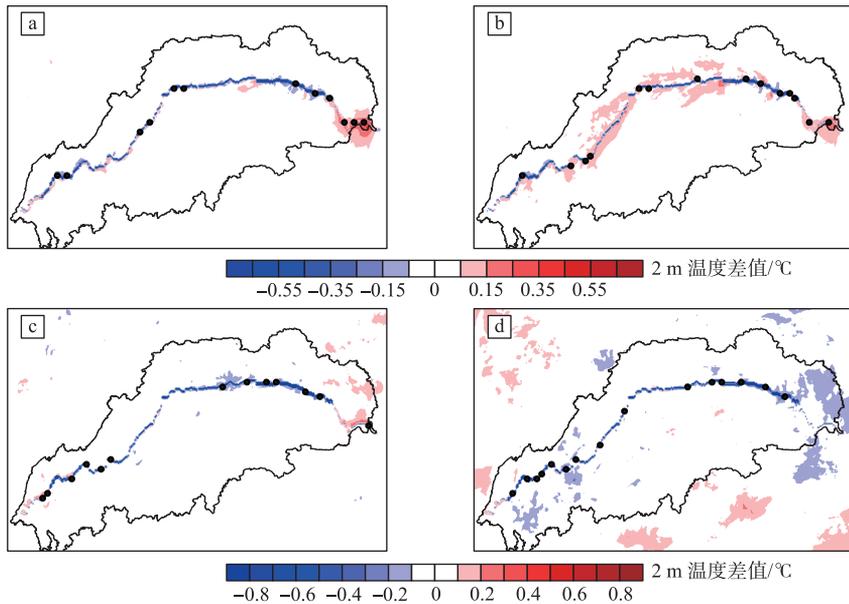


图6 高温干旱年景(2013)与低温洪涝年景(2020)冬季(a, b)、夏季(c, d)敏感性试验与参照试验 $2\text{ m}$ 温度差值(打点区为通过95%显著性检验区域)

Fig.6 Difference of  $2\text{ m}$  temperature between sensitivity run and control run during 2013 (a, c) and 2020 (b, d) in Jan.(a, b) and Jul.(c, d) (Regions with 95% confidence level of differences are highlighted with black dots)

水库建成后,水位抬升( $120\text{ m}$ ),水位高度差带来的气温垂直递减作用主导了上述库区水体位置处的降温效应,同时,水体表面粗糙度小,风速增大,蒸发加强,带走更多热量<sup>[5]</sup>,高温干旱年库区水体与气温的温差更大,库区水体冷却效应更明显,加强了上述降温效应;另一方面,库区周边下垫面由陆面转化为水面,由于水体的辐射性质、热容量和导热率不同于陆地,因此改变了库区与大气间的热交换<sup>[4,7]</sup>,造成库区周边陆地区域夏季降温,冬季增暖。与冬季库区周边陆地区域的增暖相联系,两种典型年景相比,低温洪涝年景下,地表热量通量减小,且土壤含水量增加,库区水面与山地陆面的温度差异大于高温干旱年,水库对周边大气的增温效应更明显。上述水库运行给附近陆地区域带来的“冬暖夏凉”小气候效应与前人研究结果基本一致<sup>[4,7,22]</sup>,而本研究揭示的水库水位抬升造成的水体局地 $2\text{ m}$ 气温降低特征则是对现有认识的补充。

尽管上述气温变幅与三峡地区气温的自然变率相当(气象站平均气温的年际变率约为 $1.10^{\circ}\text{C}$ ),但降温的范围基本限制在水体区域附近。夏季,模拟区域内温度降低通过显著性检验的格点数约为600个,占三峡水体格点的50%,其中仅有8%位于库区外(图6c和6d),尽管在水库区域外也出现局部气温异常区,但这一变化未通过统计显著性检验。冬季 $2\text{ m}$ 气温变化特征与夏季也基本一致,即气温显著偏低的区域基本限制在水库范围内,约占水体格点的44%。值得注意的是,水库运行后,宜昌东南部平原地区(海拔 $50\text{ m}$ 以下)的气温呈现小范围增暖特征,尤其冬季更明显(图6a和图6b),这一地区的增暖原因及其影响值得未来

开展更多的工作进行探索。

为了定量分析三峡库区对局地气候影响的范围,将库区水体南北0~50 km各个格点上的气温差值按照距离进行分段平均,得到距三峡水库不同距离上气温的变化(图8)。如图所示,在两种典型气候年景下三峡水库引起库区内气温变化基本限制于距离水库2 km的水平范围内,距离水库2 km以外,气温变化明显减弱。冬季,水体附近气温降低约1.0°C,距离水体2 km以外的周边区域,呈现弱增温特征,变化幅度低于0.1°C(图8a);夏季,两种典型气候年景下变化特征基本一致,库区内温度减小1.2°C,距离库区2 km范围开始,降温幅度明显减弱(图8b)。

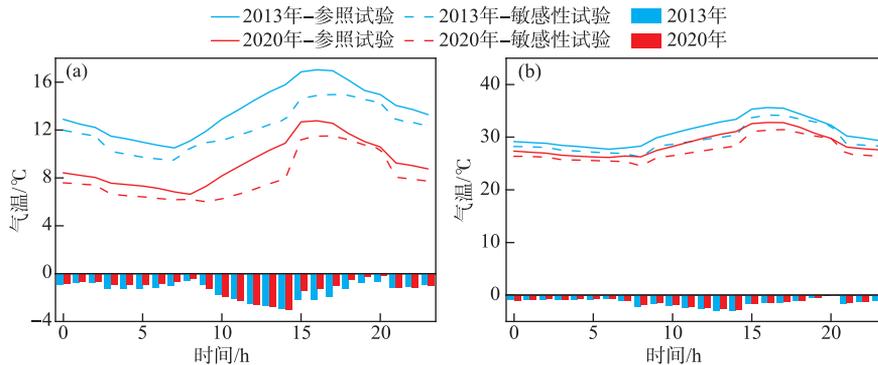


图7 区域平均2 m气温(曲线)及差值(柱状)的日变化:1月(a),7月(b)

Fig.7 Diurnal variations of 2 m air temperatures (lines) and their differences (histogram) in Jan.(a) and Jul.(b)

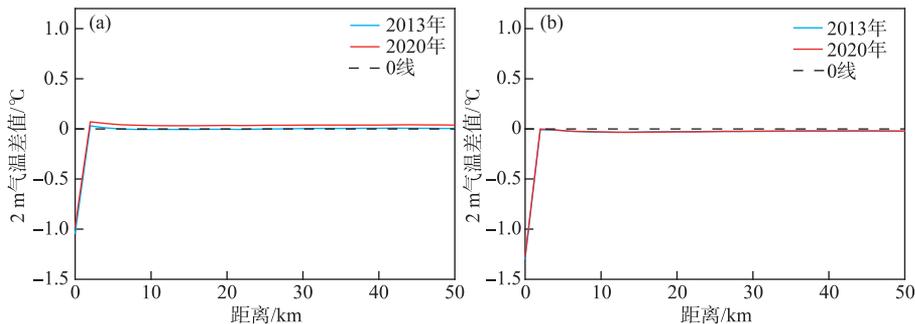


图8 敏感性试验与参照试验2 m气温差值随距离的变化:1月(a),7月(b)

Fig.8 Variation of 2 m air temperature difference as a function of distances in Jan.(a) and Jul.(b)

区域平均而言,两种典型气候年景下水库运行带来的降温幅度均随高度增加而减弱,降温基本限制在近地层200 m以内(附图Ⅲ)。冬季,离地200 m高度处,高温干旱年景、低温洪涝年景下日平均气温分别减小了0.04、0.03°C(附图Ⅲa);夏季,离地200 m高度处,高温干旱年景、低温洪涝年景下日平均气温分别减小了0.07、0.06°C(附图Ⅲb)。白天和夜间的平均温度垂直变化特征与日平均温度的变化特征类似,白天降温变化较夜间更明显。

### 3.3 水库运行对风速的影响

图9为高温干旱年景(2013)与低温洪涝年景(2020)冬、夏季敏感性试验与参照试验10 m风速差值分布。由图可知,水库运行后,两种典型年景下,水体附近的10 m风速特征以增加为主,但呈现出一定的空间差异性,可能与近地层风速易受局地微尺度环流影响有关。水库范围平均而言,水库运行引起风速增大的幅度受气候背景特征影响,夏季风速增加的幅度大于冬季。近地层风速的响应特征对气候背景(高温干旱或低温洪涝)不敏感。冬季,高温干旱年平均增加幅度为0.43 m/s,而低温洪涝年的风速增加幅度为0.57

m/s;夏季,高温干旱年风速平均增加幅度为 0.68 m/s,而低温洪涝年的增大幅度约为 0.62 m/s。将图 9 通过显著性检验的格点风速进行空间平均,得到三峡地区平均风速的日变化曲线(图 10)。如图所示,水库运行带来的平均风速夜间增加程度更明显,冬季夜间增加约 0.33~0.58 m/s,夏季夜间增加幅度可超过 0.6 m/s,水库运行导致平均风速的日较差变大。上述风速变幅略大于三峡地区风速的自然变率(气象站平均风速的年际变率约为 0.37 m/s)。

空间上来看,冬季风速影响的水平范围基本限制在水库区域内,而夏季风速增加的影响范围则超出水库区域,最远影响范围可达约 12 km(图 11b),甚至延伸至宜昌东南部的平原地区(图 9d)。具体而言,冬季,高温干旱年和低温洪涝年,模拟区域内风速增加通过显著性检验的格点数分别为 587 个和 690 个,占水库格点的 30.5% 和 33.1%(图 9a 和 9b);而夏季,高温干旱年,模拟区域内风速增加通过显著性检验的格点数为 843 个,水体范围内格点有 211 个(33.7%),最远影响范围可达约 12 km(图 9c 和图 11b),低温洪涝年,模拟区域内风速增加通过显著性检验的格点数为 1191 个,影响范围较广(图 9d 和 11b),风速的响应强度随距离增加而显著减弱(图 11)。

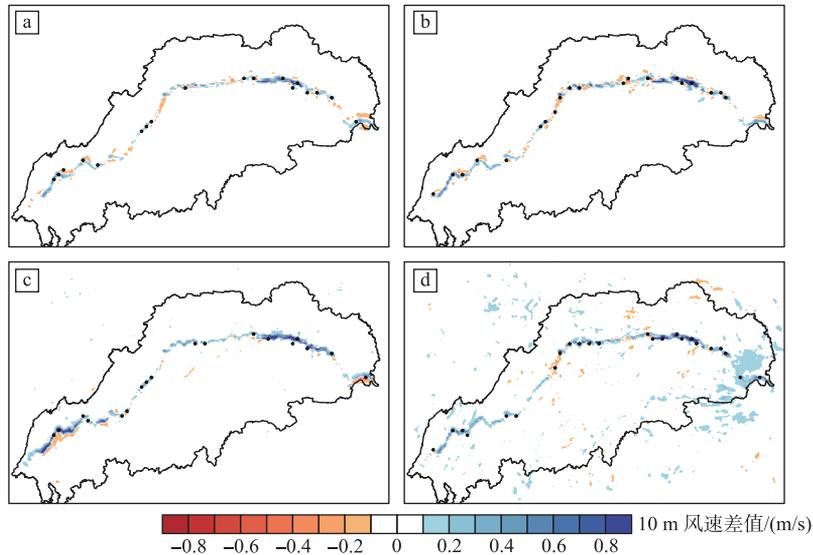


图 9 高温干旱年景(2013)与低温洪涝年景(2020)冬、夏季敏感性试验与参照试验 10 m 风速差值(打点区为通过 95% 显著性检验区域)

Fig.9 Difference of 10 m wind speed between sensitivity run and control run during 2013 (a, c) and 2020 (b, d) in Jan.(a, b) and Jul.(c, d) (Regions with 95% confidence level of differences are highlighted with black dots)

区域平均而言,水库运行带来的风速增加幅度随高度增加而减弱,夏季风速响应的垂直高度更高,但基本限制在近地层 200 m 以内(附图 IV)。日平均而言,冬季,离地 100 m 高度处,水库运行带来的风速增加不足 0.01 m/s(附图 IV a);夏季,两种典型年景下,200 m 高度处分别增大了 0.04、0.05 m/s(附图 IV b)。

可见,水库运行对风速的影响范围不再局限于水库区域,水平影响范围可达 10 km 以外。水库运行带来的风速增加主要与下垫面动力学粗糙度减小及水陆温差加大有关。

### 3.4 水库运行对相对湿度和降水量的影响

图 12 为高温干旱年景(2013 年)与低温洪涝年景(2020 年)冬、夏季敏感性试验与参照试验 2 m 相对湿度差值分布图。由图可知,水库运行后,两种典型年景下,水体位置处的 2 m 相对湿度均呈现增大的变化特征,相对湿度增大的幅度受气候背景特征影响,增强强度冬季大于夏季,高温干旱年景大于低温洪涝年景。区域平均而言,高温干旱年冬季、夏季相对湿度分别增加 5.5% 和 5.3%,而低温洪涝冬季和夏季相对湿度分

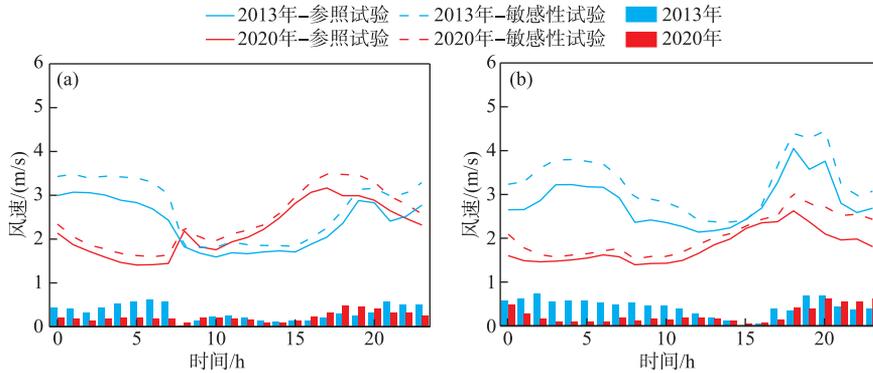


图 10 区域平均 10 m 风速及差值(柱状)的日变化:1月(a),7月(b)  
Fig.10 Diurnal variations of 10 m wind speed (lines) and their differences (histogram) in Jan. (a) and Jul. (b)

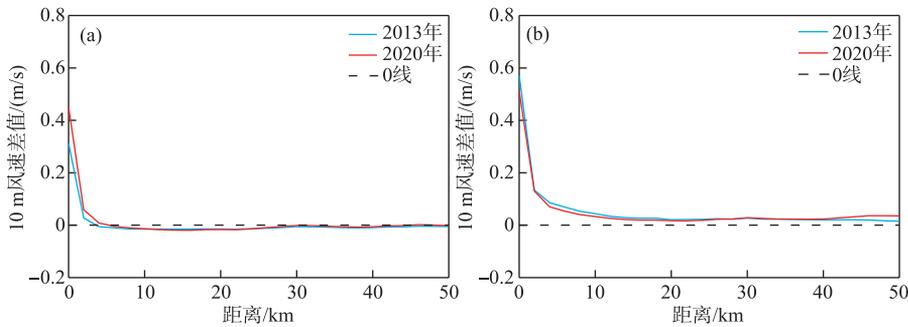


图 11 敏感性试验与参照试验 10 m 风速差值随距离的变化:1月(a),7月(b)  
Fig.11 Variation of 10 m wind speed difference as a function of distances in Jan. (a) and Jul. (b)

别增大 4.3% 和 3.9%。将图 12 通过显著性检验的格点相对湿度进行空间平均,得到三峡地区相对湿度的日变化曲线,图中可见,白天相对湿度增加程度较夜间明显,水库运行导致相对湿度的日较差变小(图 13)。与气温的变化类似,水库运行后,宜昌东南部平原地区(海拔 50 m 以下)的相对湿度呈现小范围变干特征,尤其冬季更明显。高温干旱年景(2013 年)与低温洪涝年景(2020 年)冬、夏季水体相对湿度通过显著性检验的格点变化不大,约占水体格点的 35.6%。上述相对湿度变幅与三峡地区相对湿度的自然变率相当(气象站相对湿度的年际变率约为 4.8%),但其影响范围限制在距离水库 2 km 的水平范围内,距离水库 2 km 以外的区域相对湿度变化明显减弱,且冬季与夏季具有较好的一致性(图 14)。

水库运行对相对湿度的影响主要是由于陆面转化为水面,改变了库面与大气间的水分交换,库面加强了水分蒸发,使库区附近的空气湿度增加<sup>[5,7]</sup>。高温干旱年景的气温较低温洪涝年偏高,增加了库区水体的蒸发,同时降水偏少,土壤含水量减少,水库水面与山地陆面之间的湿度差异增大,水库的增湿效应更明显。

综上所述,三峡水库运行在一定程度上降低了气温、增加了相对湿度和近地层平均风速,但其影响的水平及垂直范围非常有限,且三峡水库本身是典型的河道型水库,长条形水库特点叠加上述气候影响后,使得水库运行难以对大尺度背景环流产生有效影响。而对大尺度环流依赖度较高的降水也难以对水库运行产生明确的响应特征,表现在水库运行前后,降水异常区的分布比较零散,且正负相间,空间异质性较强,且大多未通过统计显著性检验(附图 V)。上述响应特征与 Li 等指出的三峡水库运行对其周边区域的降水模式未产生明显影响的结论基本一致<sup>[23-24]</sup>。

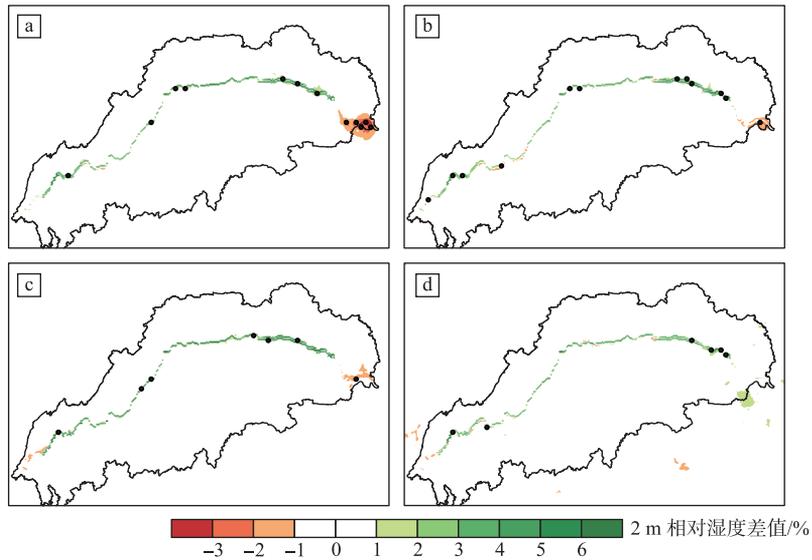


图 12 高温干旱年景(2013)与低温洪涝年景(2020)冬、夏季敏感性试验与参照试验 2 m 相对湿度差值(打点区为通过 95% 显著性检验区域)

Fig.12 Difference of 2 m relative humidity between sensitivity run and control run during 2013 (a, c) and 2020 (b, d) in Jan.(a, b) and Jul.(c, d) (Regions with 95% confidence level of differences are highlighted with black dots)

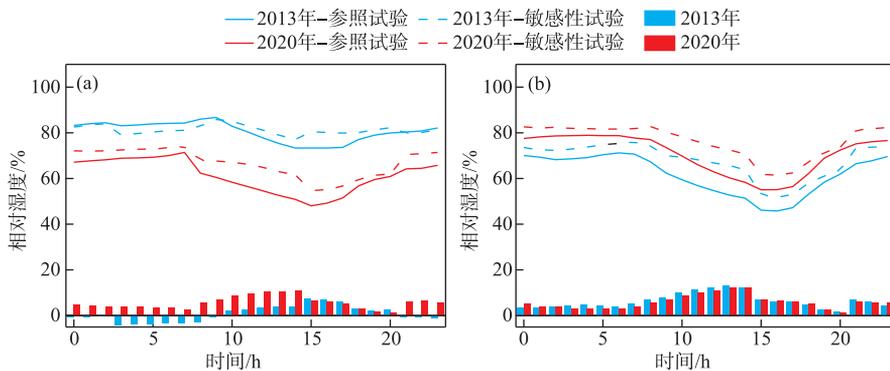


图 13 区域平均 2 m 相对湿度(曲线)及差值(柱状)的日变化:1 月(a),7 月(b)

Fig.13 Diurnal variations of 2 m relative humidity (lines) and their differences (histogram) in Jan.(a) and Jul.(b)

#### 4 小结与讨论

选取三峡水库作为研究区域,通过扩宽水体面积和抬升水位高度刻画的三峡水库蓄水相关的陆面参数变化,在此基础上,开展高温干旱年景(2013 年)与低温洪涝年景(2020 年)下冬季、夏季典型月(1 月、7 月)的敏感性数值试验,通过对不同年份、不同季节敏感性试验与参照试验气象要素差值进行统计分析,探究三峡水库成库以来的气候效应,结果发现,冬、夏季两种典型年景下:

1) 水体位置处的 2 m 气温均呈现降低的变化特征,且影响范围限于水库附近。高温干旱年景降温程度

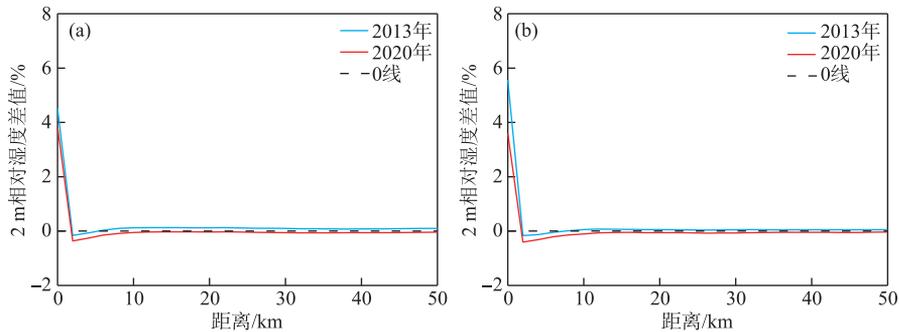


图 14 敏感性试验与参照试验 2 m 相对湿度差值随距离的变化:1 月(a),7 月(b)

Fig.14 Variation of 2 m relative humidity difference as a function of distances in Jan.(a) and Jul.(b)

大于低温洪涝年景,夏季降温程度大于冬季,且白天降温程度更明显,夜间降温弱,水库运行导致气温日较差变小。近地面降温最明显,降温程度随高度增加而减小,夏季水库运行引起的气温变化的垂直高度更高,但均限制在水库范围内。

2) 水体位置处的 10 m 风速均呈现增大的变化特征,夏季风速的增加程度强于冬季,白天风速增加程度弱于夜间,水库运行导致风速日较差增大。低温洪涝年景较高温干旱年景的降温变化范围更大且影响范围超出水库局地区域。近地面风速增大最明显,风速增大程度随高度增加而减小,夏季水库运行引起的气温变化的垂直高度更高,但均限制在水库范围内。

3) 水体位置处的 2 m 相对湿度均呈现增大的变化特征,增湿强度冬季大于夏季,白天相对湿度增加程度较夜间明显,水库运行导致相对湿度的日较差变小。高温干旱年变化幅度大于低温洪涝年,但影响的空间范围集中在水体附近。

需要指出,本文的结论主要是基于数值模拟结果而得出的,中尺度模式特有的时空平滑性给水库附近的微物理过程描述带来较大难度;同时,不同数值参数化方案的组合、下垫面数据精细程度等因素在一定程度上影响模式的模拟结果,未来可通过加密实地观测、完善精细化模拟方案等方式来改善上述问题;另一方面,引入不同排放情景下的气候变化预估数据,可基于本文建立的水库蓄水气候效应数值模拟方法,进一步开展未来气候变化情景下,三峡水库运行的潜在气候效应评估工作。除此之外,尽管本文通过文献综述和定性分析的方式,对水库气候效应的产生原因进行了初步讨论分析,但由于三峡水体宽度及深度存在季节性变化,其背后的物理机理仍需开展更加深入的研究分析工作。

虽然三峡水库的运行在一定程度上会对库区周边气候产生影响,但是三峡水库与周边海洋、青藏高原相比,无论是面积还是容量都不是一个量级的,其引起的气象变量的变化范围大多局限于近地层局地范围内,对区域气候的影响非常有限,远不及其在防灾减灾和应对气候变化中的巨大贡献。

## 5 附录

附表 I 和附图 I ~ V 见电子版 (DOI: 10.18307/2023.0227)。

## 6 参考文献

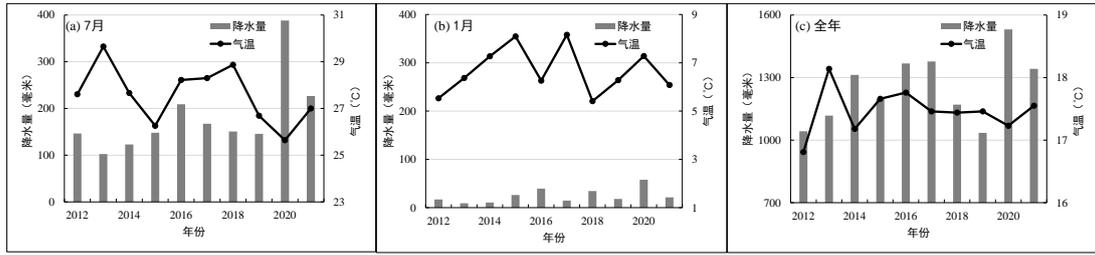
- [ 1 ] Zhang HT, Zhu CH, Zhang Q. Numerical modeling of microclimate effects produced by the formation of the Three Gorges Reservoir. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, **13**(2): 133-137. [张洪涛, 祝昌汉, 张强. 长江三峡水库气候效应数值模拟. 长江流域资源与环境, 2004, **13**(2): 133-137.]
- [ 2 ] Miller NL, Jin JM, Tsang CF. Local climate sensitivity of the Three Gorges Dam. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(16): L16704. DOI: 10.1029/2005GL022821.
- [ 3 ] Wu LG, Zhang Q, Jiang ZH. Three Gorges Dam affects regional precipitation. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(13): L13806. DOI: 10.1029/2006GL026780.
- [ 4 ] Ma ZS, Zhang Q, Qin YY. Numerical simulation and analysis of the effect of Three Gorges Reservoir project on the regional climate change.

- Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(9): 1044-1052. [马占山, 张强, 秦琰. 三峡水库对区域气候影响的数值模拟分析. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(9): 1044-1052.]
- [ 5 ] Wu J, Gao XJ, Zhang DF *et al.* Regional climate model simulation of the climate effects of the Three Gorges Reservoir with specific application to the summer 2006 drought over the sichuan-Chongqing area. *Journal of Tropical Meteorology*, 2011, **27**(1): 44-52. [吴佳, 高学杰, 张冬峰等. 三峡水库气候效应及 2006 年夏季川渝高温干旱事件的区域气候模拟. 热带气象学报, 2011, **27**(1): 44-52.]
- [ 6 ] Li Q, Li YH, Zhou SQ *et al.* Numerical experimentation of local underlying surface effect based on WRF model in Three Gorges area. *Plateau Meteorology*, 2011, **30**(1): 83-93. [李强, 李永华, 周锁铨等. 基于 WRF 模式的三峡地区局地下垫面效应的数值试验. 高原气象, 2011, **30**(1): 83-93.]
- [ 7 ] Li Y, Gao YH, Chen XY *et al.* The impact of the land use change associated with the Three Gorges Dam on regional climate change. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2011, **47**(3): 330-338. [李艳, 高阳华, 陈鲜艳等. 三峡下垫面变化对区域气候效应的影响研究. 南京大学学报: 自然科学版, 2011, **47**(3): 330-338.]
- [ 8 ] Wang Z, Du Q, Bai YY. Numerical simulation of Chongqing meteorological elements influenced by the underlying surface changes in the Three Gorges Reservoir area. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2012, **34**(3): 102-109. [王中, 杜钦, 白莹莹. 三峡下垫面变化对重庆气象要素影响的数值模拟. 西南大学学报: 自然科学版, 2012, **34**(3): 102-109.]
- [ 9 ] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地面气象观测站气象探测环境调查评估方法: GB/T 35219-2017. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [ 10 ] Saha S, Moorthi S, Wu XR *et al.* The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of Climate*, 2014, **27**(6): 2185-2208. DOI: 10.1175/jcli-d-12-00823.1.
- [ 11 ] Hong SY, Dudhia J, Chen SH. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*, 2004, **132**(1): 103-120. DOI: 10.1175/1520-0493(2004)1320103: aratim>2.0.co;2.
- [ 12 ] Mlawer EJ, Taubman SJ, Brown PD *et al.* Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, **102**(D14): 16663-16682. DOI: 10.1029/97JD00237.
- [ 13 ] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, **46**(20): 3077-3107. DOI: 10.1175/1520-0469(1989)04603077: nsocod>2.0.co;2.
- [ 14 ] Nakanishi M, Niino H. An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, **119**(2): 397-407. DOI: 10.1007/s10546-005-9030-8.
- [ 15 ] Jiménez PA, Dudhia J, González-Rouco JF *et al.* A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Monthly Weather Review*, 2012, **140**(3): 898-918. DOI: 10.1175/mwr-d-11-00056.1.
- [ 16 ] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn state-NCAR MM5 modeling system. part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 2001, **129**(4): 569-585. DOI: 10.1175/1520-0493(2001)1290569: caalsh>2.0.co;2.
- [ 17 ] Kain JS. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, **43**: 170-181. DOI: 10.1175/1520-0450(2004)04360;0170:tkcpau62;2.0.co;2.
- [ 18 ] Cui T, Chen XX, Zou XK *et al.* State of the climate in the Three Gorges Region of the Yangtze River basin in 2020. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2021, **15**(2): 1-6. DOI: /10.1016/j.aosl.2021.100112.
- [ 19 ] Sun HW, Luo Y, Zhao ZC *et al.* The impacts of Chinese wind farms on climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(10): 5177-5187. DOI: 10.1029/2017jd028028.
- [ 20 ] Chang R, Luo Y, Zhu R. Simulated local climatic impacts of large-scale photovoltaics over the barren area of Qinghai, China. *Renewable Energy*, 2020, **145**: 478-489. DOI: 10.1016/j.renene.2019.06.059.
- [ 21 ] Song Z, Liang SL, Feng L *et al.* Temperature changes in Three Gorges Reservoir Area and linkage with Three Gorges Project. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, **122**(9): 4866-4879. DOI: 10.1002/2016JD025978.
- [ 22 ] Chen XY, Zhang Q, Ye DX *et al.* Regional climate change over Three Gorges Reservoir area. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(1): 47-51. [陈鲜艳, 张强, 叶殿秀等. 三峡库区局地气候变化. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(1): 47-51.]
- [ 23 ] Li Y, Zhou WC, Chen XY *et al.* Influences of the Three Gorges Dam in China on precipitation over surrounding regions. *Journal of Meteorological Research*, 2017, **31**(4): 767-773. DOI: 10.1007/s13351-017-6177-4.
- [ 24 ] Li Y, Wu LG, Chen XY *et al.* Impacts of Three Gorges Dam on regional circulation: A numerical simulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, **124**(14): 7813-7824. DOI: 10.1029/2018JD029970.

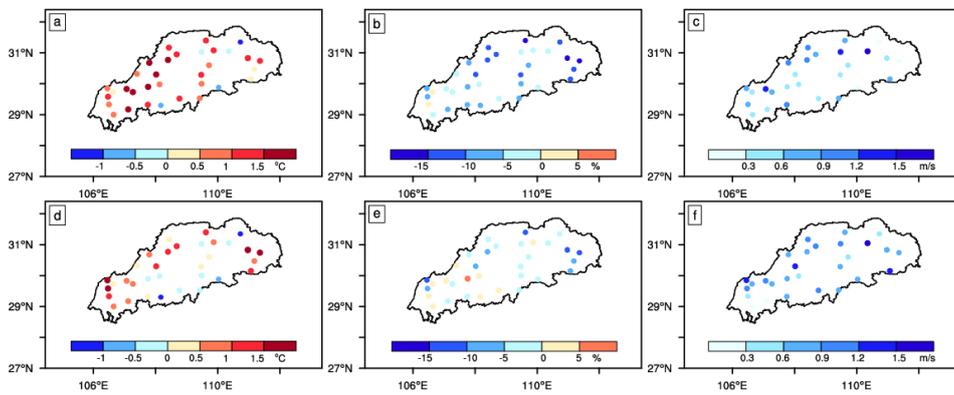
附表 I 三峡水库气候效应数值模拟相关研究

Attached Tab.I List of researches relative to the climate effect of the TGR based on numerical simulation

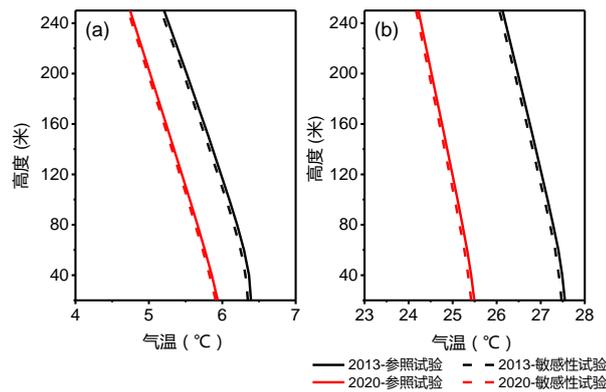
作者	期刊	数值模式	空间分辨率	积分时间	参数化方案	模式驱动数据	分析变量
张洪涛等, 2004	长江流域资源与环 境	准静力边界层 模式	水平格距: 333.3 m; 大气层顶 5 km	冬春季代表日: 7月1日和1月1日	水域面积扩大	单点均匀静态要素, 高度简 化的参数模型	风速、气温 比湿
刘红年等, 2010	云南大学学报	非静力边界层 模式	水平网格距 500 m	2001 和 2005 年, 1、4、8、10 月 每月 10-20 日	修改土地利用类型: 陆地替换为水体	中尺度气象模式 WRF 提供	风速、气温、湿 度
Miller et al, 2005	GRL	非静力 MM5	90 km-30 km-10 km	1990 年 4 月 2-5 月 16 日 (8 周无雨日)	修改土地利用类型: 陆地替换为水体	NCEP 粗网格: 2.5°×2.5°, 6 小时	潜热、感热 肤温、气温
Wu et al, 2006	GRL	非静力 MM5	9 km-3 km	2003 年 8 月 1-30 日	修改土地利用类型: 陆地替换为水体	NCEP 粗网格: 2.5°×2.5°, 12 小时	气温 降水量
马占山等, 2010	长江流域资源与环 境	非静力 MM5	13.5 km-4.5 km-1.5 km 垂直 23 层	2005 年 12 月-2006 年 2 月, 2006 年 4 月, 2006 年 7-9 月	修改土地利用类型: 陆地替换为水体	FNL: 1°×1°, 6 小时	气温、降水 相对湿度
吴佳等, 2011	热带气象学报	静力 RegCM3	50 km-10 km, 次网格降至 2 km	2005 年 1 月-2006 年 9 月, 连续积分	修改土地利用类型: 陆地替换为水体	NCEP 粗网格: 2.5°×2.5°, 6 小时	气温 降水量
李强等, 2011	高原气象	非静力 WRF	15 km-5 km	9 月 20 日 00:00-22 日 00:00 7 月 15 日 12:00-17 日 12:00 连续积分 48 小时	陆地替换为水体; 山体高度降低 1/2	FNL: 1°×1°, 6 小时	降水量 气温
李艳等, 2011	南京大学学报	非静力 WRF	13.5 km-4.5 km-1.5 km	2007 年 1 月 连续积分 30 天	下垫面替换为水体	FNL: 1°×1°, 6 小时	气温, 风速 降水量
王中等, 2012	西南大学学报	非静力 WRF	9 km-3 km 垂直 27 层	2002 年 9 月 20 日-21 日 2005 年 7 月 9 日-10 日	水体面积增加一倍 盆地东部地形降低一倍	FNL: 1°×1°, 6 小时	气温、风速、湿度、 降水



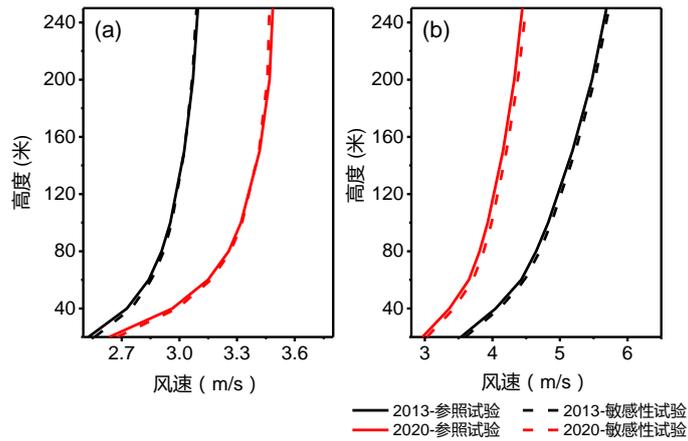
附图 I 三峡成库以来(2012-2021年)7月 (a)、1月 (b) 和年平均 (c) 降水量及气温变化  
 Attached Fig.I Changes of precipitation and average temperature in July (a), January (b) and annual average (c) after completion of TGR (2012-2021)



附图 II 三峡地区 1 月和 7 月数值模拟的逐日 2 m 气温 (a, d)、相对湿度(b, e)和 10 m 风速(c, f)与气象站观测值的平均偏差分布  
 Attached Fig.II Mean deviation of daily 2m air temperature (a, d), relative humidity (b, e) and 10m wind speed (c, f) between simulated results and observations from meteorological stations during January and July.

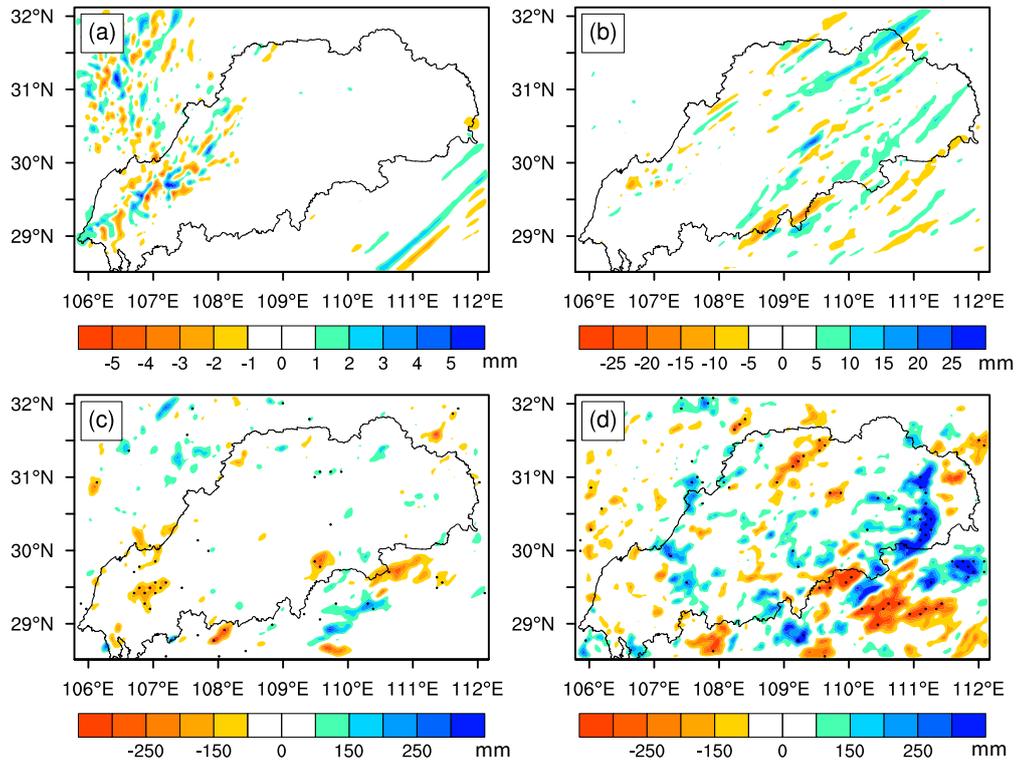


附图 III 区域平均的气温垂直变化: 1 月 (a); 7 月 (b)  
 Attached Fig.III Variation of temperatures as a function of heights in Jan (a) and Jul (b)



附图 IV 区域平均的风速垂直变化：1月 (a)；7月 (b)

Attached Fig.IV Variation of wind speed (units: m/s) as a function of heights in Jan (a) and Jul (b)



附图 V 高温干旱年景（2013）与低温洪涝年景（2020）冬、夏季敏感性试验与参照试验累计降水量差值（打点区为通过 95%显著性检验区域）

Attached Fig.V Difference of total precipitation between sensitivity run and control run during 2013 (a, c) and 2020 (b, d) in Jan (a, b) and Jul (c, d) (Regions with 95% confidence level of differences are highlighted with black dots)