



基于数值模拟对三峡库区地表能量收支特征的分析

孙晨 郭广芬 汪方 吴瑶 赵小芳

Analysis of surface energy budget characteristics in Three Gorges Reservoir area based on numerical simulation

SUN Chen, GUO Guangfen, WANG Fang, WU Yao, ZHAO Xiaofang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-222>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

三峡地基遥感垂直观测系统温湿廓线的误差分析与订正方法探讨

Error analysis and correction method of temperature and humidity profiles in the Three Gorges ground-based remote sensing vertical observation system

暴雨灾害. 2024, 43(5): 587–597 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-199>

一次华南飑线过程的边界层湍流输送及动能收支分析

Analyse of turbulent flow conveyance and kinetic energy budget in the boundary layer during the process of a South China squall line

暴雨灾害. 2025, 44(2): 186–196 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-003>

三峡坝区一次冬季持续性晴空大风的成因分析

Analysis on the causes of a continuous clear-sky gale event in winter in the Three Gorges Dam Area

暴雨灾害. 2022, 41(2): 184–191 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.009>

2007号台风“海高斯”的多尺度能量分布及转化特征分析

Analysis of distribution and transformation characteristics of multi-scale energy of typhoon Higos in 2020

暴雨灾害. 2023, 42(2): 113–123 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-182>

2017年7月29日宜昌三峡坝区一次下击暴流过程的中尺度分析

Mesoscale analysis of a downburst process in Yichang three gorges dam area on 29 July 2017

暴雨灾害. 2023, 42(2): 200–210 <https://doi.org/10.12406/byzh.2020-202>

广西沿海一次冬季暖区暴雨的多尺度能量诊断

Multiscale diagnosis of the energy budget for a warm-sector rainstorm event in winter in the coastal area of Guangxi

暴雨灾害. 2023, 42(3): 283–292 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-094>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

孙晨,郭广芬,汪方,等.2026.基于数值模拟对三峡库区地表能量收支特征的分析[J].暴雨灾害,45(3):446–456. SUN Chen, GUO Guangfen, WANG Fang, et al. 2026. Analysis of surface energy budget characteristics in Three Gorges Reservoir area based on numerical simulation [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 45(3):446–456 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–222

基于数值模拟对三峡库区地表能量收支特征的分析

孙晨^{1, 2, 3}, 郭广芬^{1, 2}, 汪方⁴, 吴瑶^{1, 2}, 赵小芳^{1, 2}

(1. 湖北省气候中心, 武汉 430074; 2. 三峡国家气候观象台, 宜昌 443002; 3. 湖北省武汉市气象局, 武汉 430048;
4. 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081)

摘要: 研究三峡库区地表能量收支的细节特征可以为定量评估水库气候效应提供科学依据。基于再分析资料 CRA-40 驱动 WRF (Weather Research and Forecasting Model) 区域气候模式, 对 2013—2022 年三峡库区夏季气候进行高精度模拟, 利用站点观测数据和 ERA5 再分析数据验证模式的可靠性, 在此基础上分析地表能量收支与辐射平衡的时空变化特征。结果表明: WRF 模式能较好地再现三峡库区气温和辐射的时空分布, 模拟结果显示云层是调控地表能量分配的关键因子, 全天空条件下的地表向下短波辐射和净短波辐射较晴空条件平均分别减少 70~130 W·m⁻² 和 50~100 W·m⁻²。地表能量收支由潜热通量主导, 其与净辐射的时间变化高度同步, 且均表现出显著的季节内变化和昼夜变化特征, 峰值分别出现在 7 月末至 8 月初和白天午后。库区水体具有显著的储热效应, 晴空午间的储热通量可超过 650 W·m⁻², 主导了净辐射的能量分配去向。研究结果可为深入理解三峡工程的气候与环境效应提供有价值的参考。

关键词: 三峡库区; 地表能量收支; WRF 模式; 辐射平衡

中图分类号: P422.4

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–222

Analysis of surface energy budget characteristics in Three Gorges Reservoir area based on numerical simulation

SUN Chen^{1, 2, 3}, GUO Guangfen^{1, 2}, WANG Fang⁴, WU Yao^{1, 2}, ZHAO Xiaofang^{1, 2}

(1. Hubei Province Climate Center, Wuhan 430074; 2. Three Gorges National Climatological Observatory, Yichang 443002;
3. Wuhan Meteorological Bureau of Hubei Province, Wuhan 430048; 4. CMA Earth System Modeling and Prediction Centre (CEMC), Beijing 100081)

Abstract: Investigating the detailed characteristics of the surface energy budget in the Three Gorges Reservoir Area can provide a scientific basis for quantifying its climatic effects. In this study, high-resolution simulations of the summer climate (2013–2022) in the Three Gorges Reservoir area were conducted using the WRF model driven by China's first-generation global atmospheric reanalysis product (CRA-40). Then the model's reliability was rigorously evaluated using station observations and ERA5 reanalysis data. Based on this, the temporal and spatial variation characteristics of surface radiation budget and energy balance were systematically analyzed. Results demonstrate that the WRF model can accurately reproduce the spatiotemporal distributions of air temperature and radiation components. The model results confirm that cloud cover is a crucial factor regulating surface energy distribution, reducing the all-sky surface downward shortwave radiation and net radiation by an average of 70~130 W·m⁻² and 50~100 W·m⁻², respectively, compared to clear-sky conditions. Latent heat flux dominates the surface energy partitioning, exhibiting high synchrony with net radiation variations. Both components display pronounced intra-seasonal and diurnal variations, with peak values occurring from late July to early August and during the afternoon hours, respectively. The water body in the reservoir induces a significant heat storage effect, with the heat storage flux under clear-sky midday conditions exceeding 650 W·m⁻², thereby altering the allocation of net radiation energy. This study provides an important data reference for further understanding the climate and environmental effects of the Three Gorges Project.

Key words: Three Gorges Reservoir area; surface energy budget; WRF model; radiation balance

收稿日期: 2025–10–23; 定稿日期: 2026–01–03

资助项目: 湖北省自然科学基金项目 (2023AFD103); 武汉市气象科技联合基金项目 (2024020901030459)

第一作者: 孙晨, 主要从事数值模拟、气候变化与评估研究。E-mail: 649026538@qq.com

通信作者: 郭广芬, 主要从事短期气候预测方法研究和决策气象服务工作。E-mail: 635499448@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

引言

三峡工程是当今世界规模最大的水利水电枢纽工程,因三峡工程蓄水而受淹没影响的地区即为三峡库区。三峡工程自2003年蓄水以来,在防洪、发电、航运等多个方面发挥了重要作用,蓄水后库区水位抬升,库区局地环境也随之变化(张萍等, 2024; 杜碧莹等, 2025)。三峡水库建成后对库区环境的影响是复杂的,部分环境效应如水库建设过程中工程建设所产生的温室气体相对容易估算,但其对气候环境的影响往往难以评估(程学军等, 2024)。通常而言,水库的气候效应主要体现在下垫面由原来的陆地改为水体,使地表的热力性质、辐射与能量平衡以及粗糙度发生改变,进而对库区及周边局地小气候产生影响(Loza and Fidélis, 2021; 张天宇等, 2023)。湄公河大坝、北美92座大坝水库、芬兰多个水库等一系列水库气候效应的研究和分析表明,裸地或植被地表改为水面之后,不仅影响区域热循环和风速,同时由于水域面积增大,实际蒸发量随之也增大,大气中的水分相应增加(Degu et al., 2011; Pokhrel et al., 2018);此外,下垫面的改变会引起区域温度的变化,造成库区与周边能量交换的加强,使得大气层结构的不稳定性增加(Jiang et al., 2022)。

近年来,许多学者对三峡库区气候效应开展了研究(郑衍欣等, 2018; 张静等, 2019)。赵子皓等(2022)系统分析了三峡库区66a来气候变化特征以及蓄水对局地气候变化的作用,发现三峡蓄水后局地温度下降、降水增加,但其影响范围有限;吴佳等(2011)基于区域气候模式研究三峡大坝对2006年夏季川渝高温干旱的影响表明,2006年高温干旱主要是由于大的环流场造成的,三峡水库在其中所起的作用较弱;Li等(2021)使用标准化降水蒸发蒸腾指数(SPEI)分析了干旱事件与厄尔尼诺与南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)及水库水位之间的关系,发现三峡水库的运行对长江流域尤其是下游的局地气候产生了一定影响,包括增加湿度、缓解干旱。也有研究表明水库的建成蓄水对局地气候的影响较大而对大范围气候的影响较小(Zhao et al., 2021)。三峡库区跨越重庆、湖北两省市,地形以山地、丘陵为主,地势起伏剧烈、河谷深切,水库蓄水后水面扩大,三峡库区地表辐射的空间分布复杂。以往对于三峡库区气候效应的研究主要针对的是基本气象要素的变化特征,三峡库区的观测数据尤其是辐射数据在时间上的不一致、不连续性以及空间分布上的不规则性制约了相关研究工作(孙晨和刘敏, 2018),因此

数值模拟成为三峡库区气候影响研究的另一重要方法。尽管许多学者通过多种数值模拟工具,通过修改库区土地利用类型的方式开展敏感性试验评估气候效应(李艳等, 2011; 李强等, 2011),但开展数值试验时往往局限于气候事件个例,缺乏长时间、连续性的模拟结果及相关分析,对库区地表能量通量等变化也缺乏深入分析。

基于此,本文利用国产再分析资料CRA-40驱动WRF (Weather Research and Forecasting Model)区域气候模式,模拟2013—2022年三峡库区夏季气候,研究三峡库区储热、太阳辐射、地表辐射等气候变化规律,揭示库区地表能量收支特征,为三峡库区的气候调节效应提供可参考的量化方法和基础数据。

1 资料与方法

1.1 资料说明

2013—2022年10a的国家气象站和区域气象站逐日气温数据以及宜昌辐射站2021年以来的逐日辐射数据,该资料来自湖北省气象大数据云平台天擎数据库,分别用于对比模式模拟的气温及辐射要素,验证模式可靠性,研究区域(105°—113°E, 28°—33°N)。用到的再分析数据包括中国气象局研发的第一代再分析资料(CRA-40)和欧洲中期天气预报中心第五代再分析产品(ERA5)(Zhou et al., 2023)。CRA-40较好再现了1979年以来从地面到55 km高度的全球三维大气及陆面状况,时间分辨率为6 h,包含30 km、0.25°、1°等多种空间分辨率,融合风云卫星、青藏高原科学试验等观测资料,在东亚区域具有一定优势(Liu et al., 2023);ERA5再分析数据水平分辨率0.25°,时间分辨率1 h。本文选取的两套再分析资料时段均为2013—2022年,空间分辨率均为0.25°,其中CRA-40用于为区域模式提供初始场和边界场,ERA5用于和模式输出结果进行对比验证。

1.2 研究方法

1.2.1 数值模拟方案设计

作为由美国环境预测中心(NCEP)、美国国家大气研究中心(NCAR)等科研团体共同开发的一体化中尺度天气气候模式,WRF模式具有开源、可移植、易维护、可扩充、高效率等特点(Skamarock et al., 2019)。WRF4.2在动力框架、物理过程、参数化方案等多个方面较以前版本进行了较大的改进和变动,常作为区域模式用于“动力降尺度”。降尺度后能有效捕捉驱动场所无法解析的关键下垫面特征(如复杂地形、水体分布等)及其与大气相互作用的细节,更真实地模拟出区域尺度的能量、水汽通量交换以

及相关的物理过程(杨扬和杨启东, 2024)。本文参考艾泽等(2023)的研究成果和实际模拟效果调整参数化方案, 表 1 列出了模式部分物理参数化方案, 其中积云参数化方案仅在 d01 和 d02 区域(图 1)使用, d03 为高精细分辨率, 未使用积云参数化方案, 其余方案在三层嵌套区域均一致。

表 1 模式物理参数化方案

Table 1 Partial physical parameterization scheme of model

模式方案选项	参数化设置
微物理方案	WSM5
积云参数化方案	Kain-Fritsch (d01,d02)
长波辐射方案	RRTM
短波辐射方案	Dudhia
边界层方案	MYNN2
陆面过程方案	Noah
城市物理方案	UCM

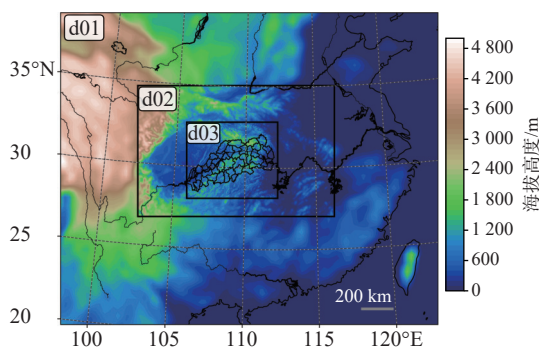


图 1 模拟区域及海拔高度 (d03 区域内含三峡库区)

Fig. 1 Simulation domain and topographic height (d03 region encompassing the Three Gorges Reservoir Area)

将再分析资料 CRA-40 作为 WRF 区域气候模式的初始场和边界场, 对三峡库区 2013—2022 年夏季的长期气候开展模拟, 模拟范围如图 1 所示。该模式模拟区域中心在 109.0°E, 30.5°N, 采用三重嵌套方案, 大、中、小区域水平分辨率分别为 30 km、6 km 和 2 km, 格点数分别为 88×73、226×151 和 313×262, 模式顶高度为 10 hPa, 垂直方向共 51 层, 为避免积分出错, 积分步长设置为自适应, 最高 12 s, 最低 2 s; 每年模拟从 5 月 21 日开始至 8 月 31 日结束, 模拟的前 10 d 作为起转平衡时间 (spin-up time) 舍弃。模拟得到高精度、长序列的包含温度、降水以及辐射等物理量数据, 与观测和再分析气象要素数据进行对比, 评估模式在三峡库区(图 1)的模拟能力。

1.2.2 地表能量平衡方程

地表能量平衡过程是陆-气相互作用的核心环节, 地表能量平衡方程可以量化地表能量收支和各

能量分量的分配, 提供一种诊断和分析地表能量交换过程的定量框架, 揭示不同下垫面和气候条件下的能量分配。地表净辐射作为地表接受的净能量, 为净短波辐射和净长波辐射之和。地表净辐射提供用于蒸发的能量, 因此对水循环有着非常直接的影响, 通常, 地表净辐射越大, 潜热通量和降水量也越大(王秋艳, 2024)。然而, 由于观测手段的限制和观测资料的缺乏, 对于地表净辐射如何分配到感热、潜热、土壤热通量和储热中, 仍具有较大不确定性, 通过数值模式模拟, 则能得到相对准确的地表能量收支分量(Wild, 2017)。地表能量平衡过程可用简化的能量平衡方程(王冠添等, 2023)来表示

$$R_n = S_{\text{down}} - S_{\text{up}} + L_{\text{down}} - L_{\text{up}} \\ = H + L + G + Q_s \quad (1)$$

式中 R_n 为地表净辐射通量, S_{down} 为地表向下短波辐射, S_{up} 为地表向上短波辐射, L_{down} 为地表向下长波辐射, L_{up} 为地表向上长波辐射, H 为感热通量, L 为潜热通量, G 为土壤热通量, Q_s 为储热, 单位均为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2 数值模拟效果检验

已有研究表明 WRF 模式在三峡库区的模拟表现较好(卢楚翰等, 2024), 图 2 给出了 WRF 模式模拟和站点观测的三峡库区 10 a 夏季平均地表温度。整体看, 模拟结果和站点观测的地表温度空间分布基本一致, 普遍在 10~35 °C。不同地区温差较大, 这与地形高度密切相关, 重庆东北部的大巴山脉及湖北西南部的高山地区温度相对周边明显偏低, 而长江所在河谷地区以及重庆、宜昌城区温度较高。尽管 WRF 模式的模拟温度相较于观测略有高估, 但高分辨率模式在揭示该复杂地形区域地表温度的精细空间结构、捕捉地形和城市化引起的强局地温差以及刻画城市或水体等关键下垫面信息等方面具有一定优势。

图 3 给出的是 2021 年和 2022 年夏季 WRF 模式模拟和宜昌站观测的逐日太阳总辐射(以下简称总辐射, 即地表向下短波辐射)和地表净辐射(以下简称净辐射, 包括净长波辐射和净短波辐射)的对比, 通过将 WRF 模式格点数据以双线性插值方法插值到宜昌站点上, 并将小时数据统一处理为日数据以进行对比验证。无论是 2021 年还是 2022 年, WRF 模式均能较好地模拟出宜昌站的总辐射和净辐射的夏季逐日变化趋势, 两者相关系数均达 0.7 以上, 且通过 0.01 的显著性水平检验, 表明模拟与观测在时间上具有显著的正相关关系。宜昌站日总辐射普遍

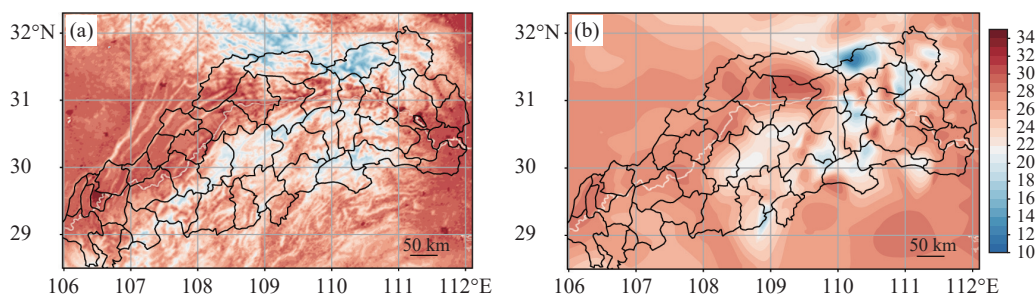


图2 三峡库区2013—2022年夏季平均地表温度(填色,单位:℃)模拟值(a)和站点观测值(b)分布(白线表示长江,黑线表示三峡库区县市边界,下同)

Fig. 2 Spatial distribution of the (a) simulated and (b) station-observed average summer surface temperature (shaded, unit: °C) over the Three Gorges Reservoir Area from 2013 to 2022 (the white line indicates the Yangtze River, the black line indicates the boundary of Three Gorges Reservoir Area)

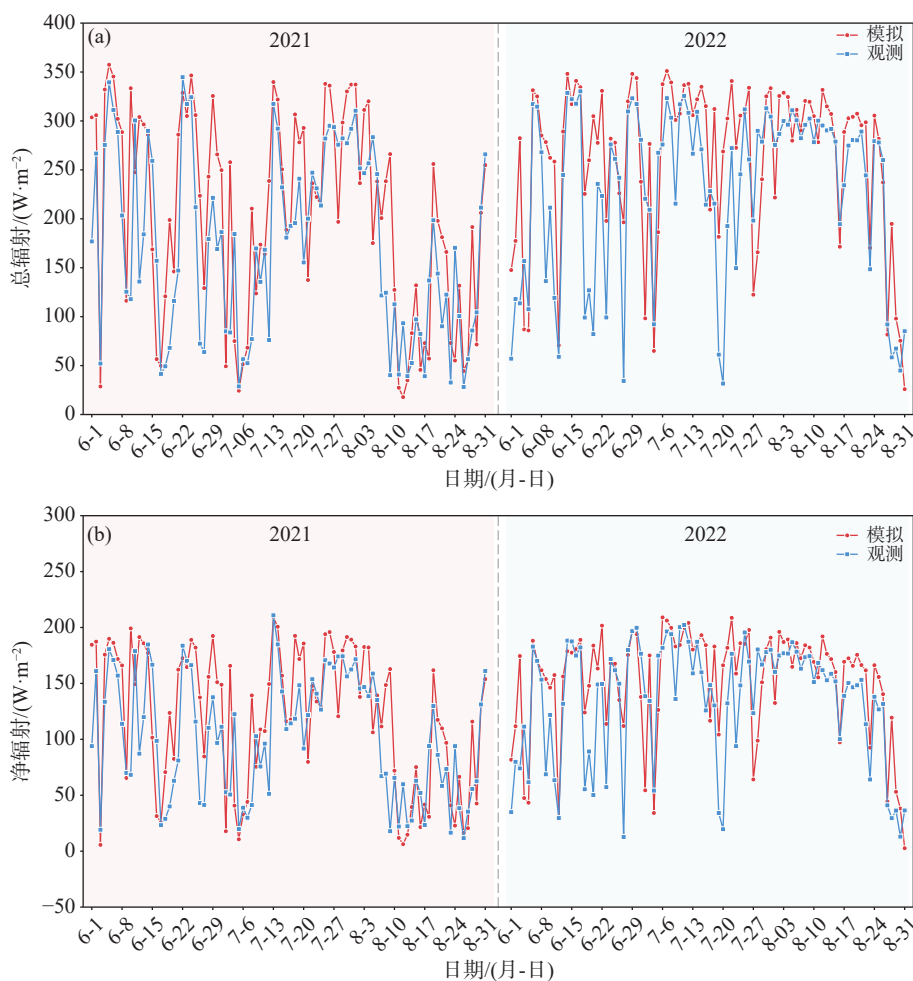


图3 2021年和2022年6—8月宜昌站观测和模式模拟的总辐射(a)与净辐射(b)逐日变化

Fig. 3 Daily variations of the observed and simulated daily (a) downward shortwave radiation and (b) net radiation at Yichang station during June–August in 2021 and 2022

在 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,最高可超过 $350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (2021年6月5日);净辐射则一般低于 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

具体来看,2021年8月中旬以后宜昌总辐射和净辐射呈显著衰减趋势,而2022年夏季宜昌二者始终较高,这与区域天气背景密切相关:2021年8月中下旬宜昌持续有降水过程,雨日高达16 d,而2022年宜昌出梅后即受副热带高压控制,始终维持晴热高

温天气,为高辐射提供了有利条件。WRF模式能较为准确地捕捉到这种变化趋势以及总辐射和净辐射的峰值出现时间,但对于峰值略有高估。此外,模式对于总辐射和净辐射的部分谷值与观测有较大差异,这可能是由于模式本身性能问题,模式物理参数化方案存在固有局限性,以及模式网格插值到站点时存在误差。整体而言,尽管WRF模式存在对辐射

的系统性高估,但仍能较好重现三峡库区的地表气温及辐射的变化特征,其模拟性能可以满足对三峡库区地表能量收支特征分析的研究需求 (Simonet et al., 2023)。

3 三峡库区地表能量收支特征

3.1 地表能量收支的空间分布特征

为探究云对辐射的影响,将三峡库区夏季每日分为“全天空 (all sky)”和“晴空 (clear sky)” (杨溯等, 2013)。“全天空”即包含了所有数据 (大气、云、气溶胶等) 的综合影响;而“晴空”则是根据 WRF 模式输出结果中包含的多层云量结果,采用最大重叠假设计算得到每个网格点的日平均总云量,在此基础上筛选出单日区域平均云量少于 30% 的数据。

图 4 给出模式模拟的三峡库区地表向下短波辐

射、地表向上短波辐射和净短波辐射在全天空和晴空条件下的空间分布,从中看到,全天空条件下三峡库区夏季平均地表向下短波辐射一般在 $130\sim 280\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,重庆北部和宜昌东部的平原地区辐射值明显高于山区,此外重庆与湖北交界处的长江河谷地区地表向下短波辐射超过 $250\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 4b),这种空间分布特征在地表向上短波辐射和净短波辐射中也有类似体现。三峡库区的地表向上短波辐射在全天空条件下介于 $15\sim 75\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间,净短波辐射则为 $80\sim 260\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,低值区主要位于长江南部的恩施及重庆高山地区 (图 4d, f)。而在晴空条件下,由于不考虑云对辐射的吸收和散射作用,短波辐射明显大于全天空,尤其是地表向下短波辐射和净短波辐射: 三峡库区的地表向下短波辐射普遍超过了 $250\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,尤其是重庆主城区到宜昌长江段及周边地区,达 $300\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 以

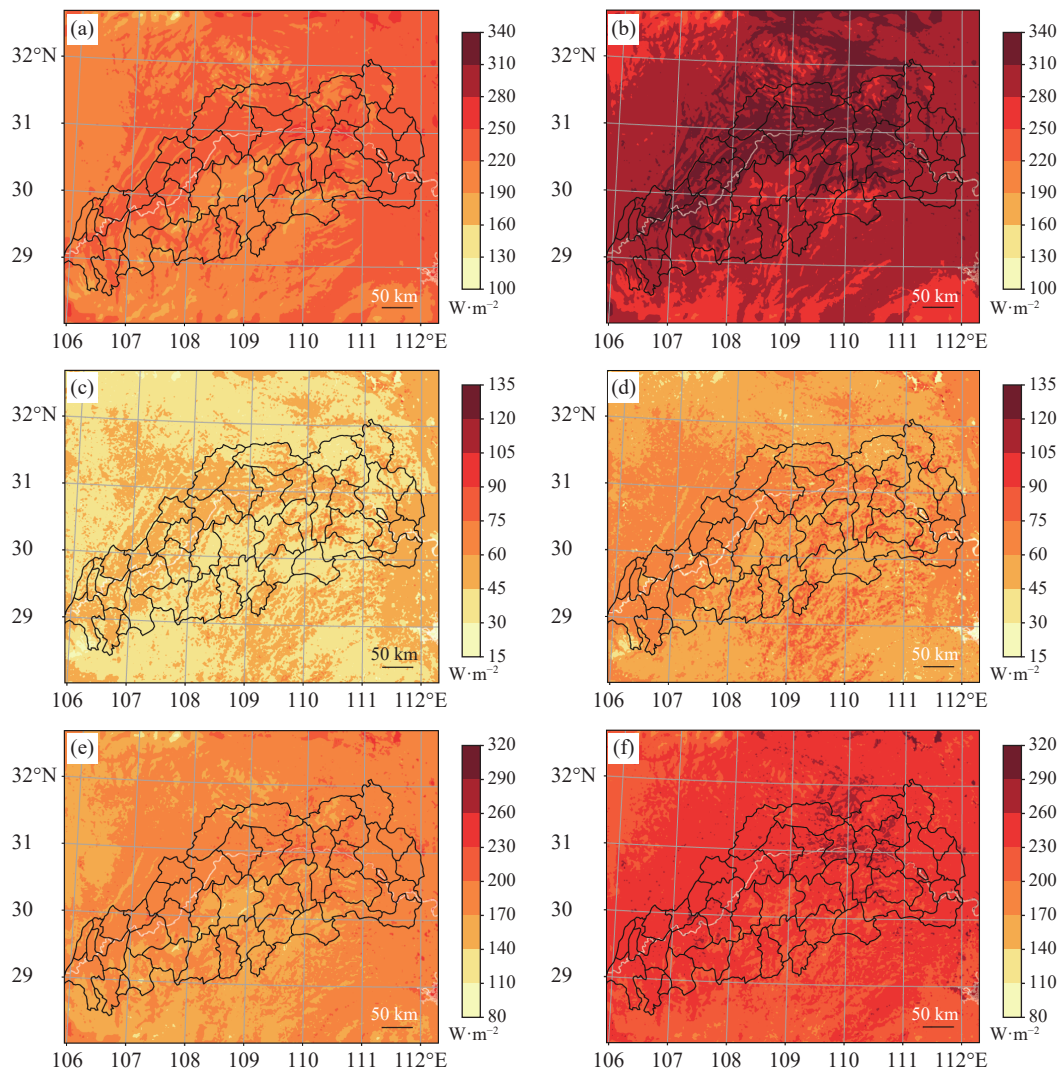


图 4 模式模拟 2013—2022 年三峡库区夏季在晴空 (a, c, e) 和全天空 (b, d, f) 条件下平均地表向下短波辐射 (a, b)、地表向上短波辐射 (c, d) 和净短波辐射 (e, f) 的空间分布

Fig. 4 Simulated spatial distribution of average summer (a, b) surface downward shortwave radiation, (c, d) surface upward shortwave radiation, and (e, f) net shortwave radiation under (a, c, e) clear-sky and (b, d, f) all-sky conditions over the Three Gorges Reservoir Area during 2013–2022

上(图4a),这直观反映无云条件下更强的太阳直接辐射。相较而言,地表向上短波辐射在晴空与全天空条件下的差值相对较小,晴空的地表向上短波辐射比全天空高 $10\sim 30\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (图4c),这是由于地表反照率主要由下垫面决定,云对其直接影响较小,主要通过改变入射辐射间接影响,即云层通过将大量入射太阳短波辐射反射回太空,同时由于地表向上短波辐射受地表控制且对云况相对不敏感,显著降低了地表可获得的净短波辐射能量。夏季三峡库区云层会使地表向下短波辐射平均减少 $70\sim 130\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,地表净短波辐射减少 $50\sim 100\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

与图4类似,图5给出2013—2022年三峡库区夏季平均全天空和晴空条件下地表向下长波辐射、地表向上长波辐射和净长波辐射的空间分布。与地表向下短波辐射主要受太阳高度角和云层反射影响不同,地表向下长波辐射主要源于大气发射,其强度依赖气温、湿度和云等,因此其空间分布模式常与短

波辐射呈现相反特征。其分布在模拟区域内呈两边高、中间低的特征,全天空条件下重庆东北部与湖北交界处的夏季平均地表向下长波辐射相对较低,约为 $330\sim 370\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,而重庆西部四川盆地与宜昌东部江汉平原等地势平缓、海拔较低的区域地表向下长波辐射可达 $420\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上(图5b)。晴空条件下地表向下长波辐射空间分布与全天空基本类似,模拟区域的地表向下长波辐射高值区数值与全天空条件相比略有下降但仍维持较高水平,而重庆与湖北交界处三峡库区的低值区的数值下降更为显著,降至 $315\sim 345\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (图5a),导致其空间分布上低值特征更加明显。全天空和晴空条件下地表向上长波辐射空间分布也都类似于地表向下长波辐射,全天空条件下,三峡库区空间差异显著,大部分区域介于 $350\sim 510\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间(图5d);晴空条件下,地表向上长波辐射普遍高于全天空条件,空间差值为 $10\sim 30\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (图5c),因为晴空条件下地表吸收的净短波辐射显著增加,导

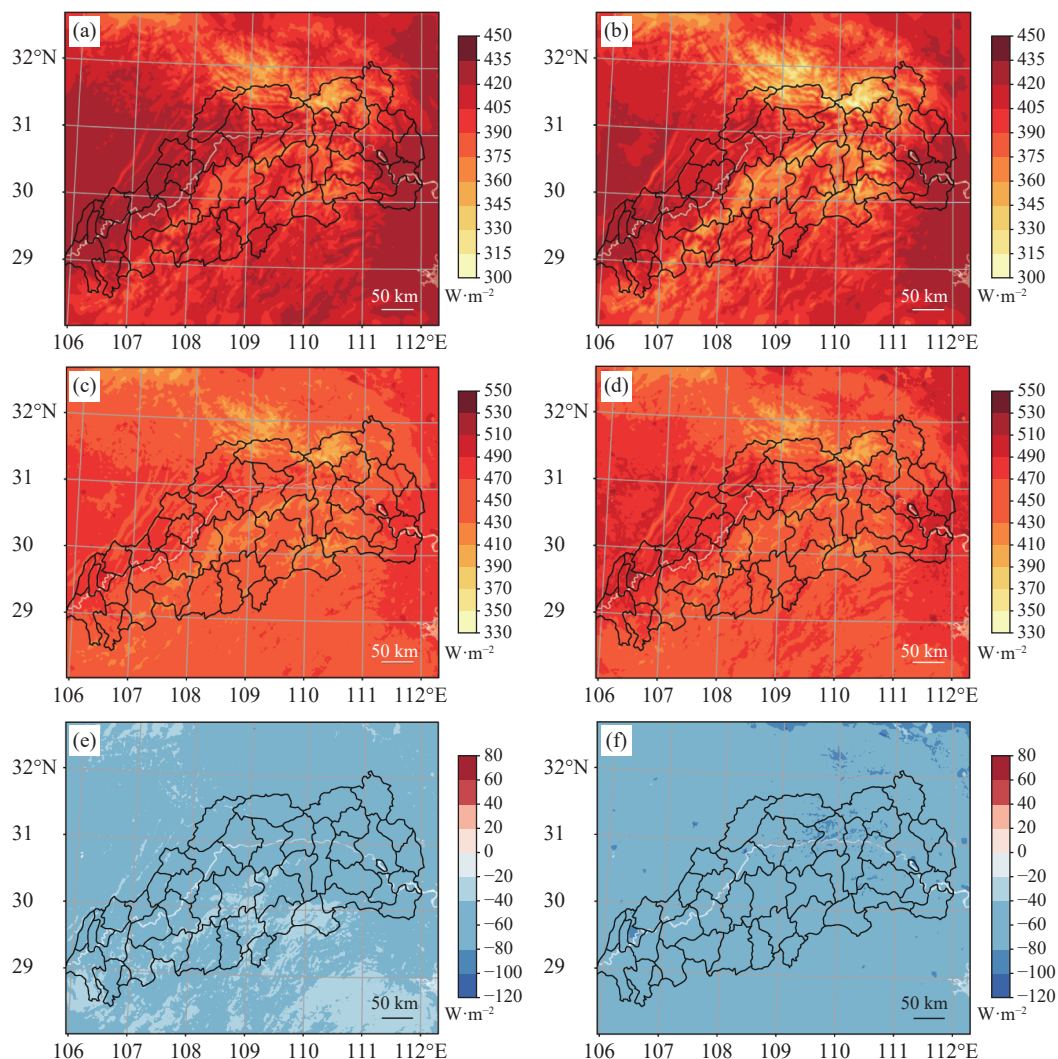


图5 同图4,但为长波辐射

Fig. 5 Same as fig.4, but for longwave radiation

致地表温度升高,从而增强了地表的长波发射。三峡库区夏季平均地表净长波辐射在两种条件下均为负值,空间分布上大部分区域介于 $-100\sim 0\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间,两种条件下大致相当,仅在长江南岸的重庆丰都、石柱以及湖北恩施等地晴空地表净辐射比全天空低 $20\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,这主要源于这些区域在晴空条件下地表向下长波辐射的降幅大于地表向上长波辐射的增幅,具体驱动机制可能与下垫面热力特性以及云-辐射相互作用的区域差异有关。

3.2 地表能量收支的时间变化特征

净辐射的能量分配去向包括感热通量、潜热通量、土壤热通量等。其中感热通量为地表与大气间通过温差传递的热量,潜热通量代表水分蒸发或凝结消耗的热量,土壤热通量表示地表向地下传递的热量。从2013—2022年三峡库区夏季全天空和晴空条件下历年区域平均感热通量、潜热通量和净辐射逐年变化图(图6)可见,感热通量在三者之间的量值最小,无论是全天空还是晴空都不超过 $45\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,且波动变化较一致,最小值均出现在2020年,分别为 $27\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $37\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,与2020年降水异常偏多的区域极端气候事件关联显著;全天空条件下呈 $0.18\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的略微上升趋势(图6a),晴天条件下基本维持不变(图6b)。潜热通量的夏季平均在全天空条件下大致在 $88\sim 103\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,呈下降趋势,下降速率为 $-0.24\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,而晴空条件下呈 $0.68\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的上升趋势,反映了云层削减太阳辐射对蒸散的抑制作用,同时晴空时段净辐射增强及库区水域扩张可能共同驱动这一上升趋势。在净辐射方面,晴空比全天空条件平均高约 $30\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,且全天空的年变化趋势平缓,而晴空的上升速率为 $0.8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,表明云层对地表能量平衡存在调控作用。综合来看,尽管各辐射分量年际变化趋势均未通过0.01的显著性水平检验,

但全天空和晴空还是表现出明显差异:全天空条件下云削弱短波辐射,抑制感热及潜热交换;晴空条件下能量通量增强,且潜热响应强于感热,符合湿润下垫面的能量分配情况。云层增多不仅减少了地表可用的净辐射,其伴随的高空气湿度环境也抑制了蒸散驱动力,共同导致了潜热通量的降低。这种云-辐射-能量通量的耦合机制,是此期间能量平衡格局变化的主要原因。

除对不同辐射分量年变化趋势分析外,对全天空条件下夏季的日变化也进行了讨论。从2013—2022年10 a平均的三峡库区逐日感热通量、潜热通量、土壤热通量和净辐射变化图(图7)看到,在三峡库区大部分地区为植被覆盖区的情况下,土壤热通量量值最小(模式中土壤热通量为负值时代表获得能量),在夏季呈逐渐减小的趋势,6、7月明显大于8月,这反映了夏季土壤热储的典型动态,前期6—7月以吸热储存为主,后期8月吸热速率显著放缓或趋于平衡。感热通量仅高于土壤热通量,且夏季逐日变化相对平缓,因为地表吸收净辐射大部分用于蒸发,分配给感热的比例相对较小,且感热通量受土壤湿度、植被蒸腾状态的影响相对较小,变化幅度通常不如潜热通量显著(张戈等,2023)。净辐射和潜热通量的逐日变化高度一致,6月前期波动上升,到7月底至8月初达到峰值(平均潜热通量超过 $120\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、净辐射超过 $160\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$),随后迅速下降,到8月中下旬已明显低于6月和7月。这种同步变化清晰表明,在水分供应总体充足的三峡库区夏季,地表吸收的净辐射能量主要被用于蒸散耗热,峰值期的出现与梅雨结束、伏旱晴空日增多导致太阳辐射增强密切相关,而其8月中下旬的下降则主要受太阳辐射减弱和持续伏旱可能引发的土壤水分胁迫抑制蒸散的双重影响。

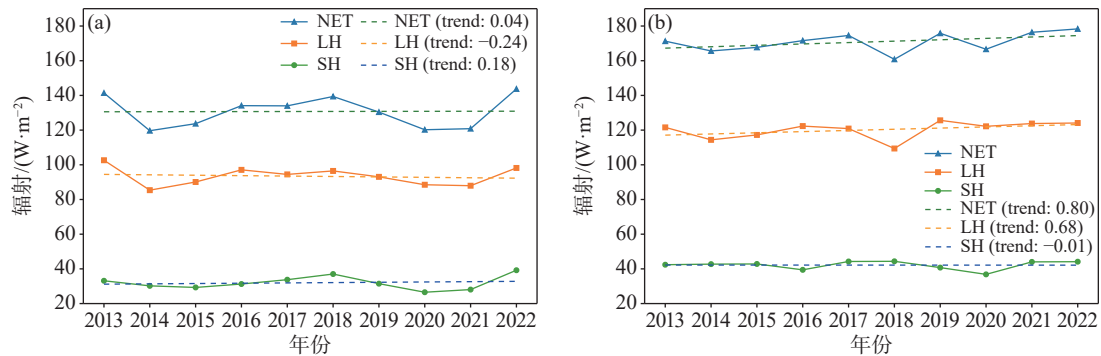


图6 模式模拟的2013—2022年三峡库区夏季全天空(a)和晴空(b)条件下平均感热通量(SH)、潜热通量(LH)和净辐射(NET)逐年变化(实线)及气候趋势(虚线)

Fig. 6 Simulated interannual variations (solid lines) and climate trends (dashed lines, unit: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) of the average summer sensible heat flux (SH), latent heat flux (LH), and net radiation (NET) over the Three Gorges Reservoir Area during 2013—2022 under (a) all-sky and (b) clear-sky

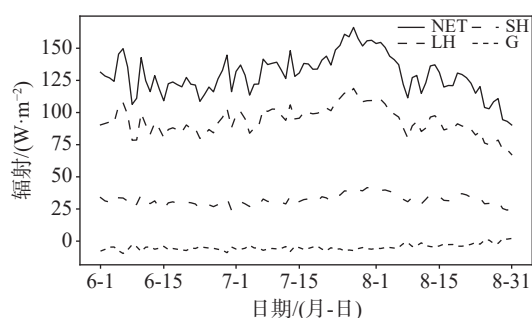


图7 模式模拟的2013—2022年夏季全天空条件下三峡库区平均感热通量(SH)、潜热通量(LH)、土壤热通量(G)和净辐射(NET)逐日变化

Fig. 7 Simulated mean diurnal cycles of sensible heat flux (SH), latent heat flux (LH), soil heat flux (G), and net radiation (NET) over the Three Gorges Reservoir Area during summer (2013–2022) under all-sky conditions

值得注意的是,7月下半月至8月上半月也即俗称“七下八上”的防汛关键期。此期间强大的地表能量输入、较高的潜热通量是引发高温热浪、加剧大气不稳定性并为局地突发性强降水提供关键能量和水汽条件的核心地表过程。因此,精确刻画地表能量通量的时空特征,对深入理解三峡库区高影响天气的触发机制和提升预报预警能力具有重要价值。

图8给出三峡库区夏季区域平均感热通量、潜

热通量、土壤热通量和净辐射在全天空和晴空条件下的日变化曲线。从中看到,不同辐射分量在全天空和晴空条件下的变化趋势较为一致,夜间20时至次日05时(北京时,下同)无短波辐射输入,地表能量交换为长波辐射主导。05时之后各辐射通量逐渐增强,净辐射和感热通量在中午14时左右达到峰值,随后逐步下降直至20时;但晴空条件下各辐射分量普遍高于全天空,白天时的净辐射和潜热通量尤为明显:感热通量在全天空和晴空的峰值介于 $110\sim 150\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,而晴天净辐射和潜热通量高达 $546\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $336\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (14时)(图8b),相较于全天空分别高出约 $120\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $110\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (图8a)。这表明云层削减短波辐射使净辐射减少,其长波补偿效应不足以抵消损失,进而限制了感热与潜热的能量分配。白天净辐射为正,大部分分配于感热和潜热,剩余分配给土壤热通量;夜间地表净失能,由土壤释热及空气冷却平衡,维系能量闭合(姚思源等,2025)。整体而言,昼夜能量分配受太阳辐射主导,晴空条件获取能量显著较高;云层通过削弱短波辐射重构了能量分配格局,并对蒸散过程(即潜热通量)产生显著的抑制作用。

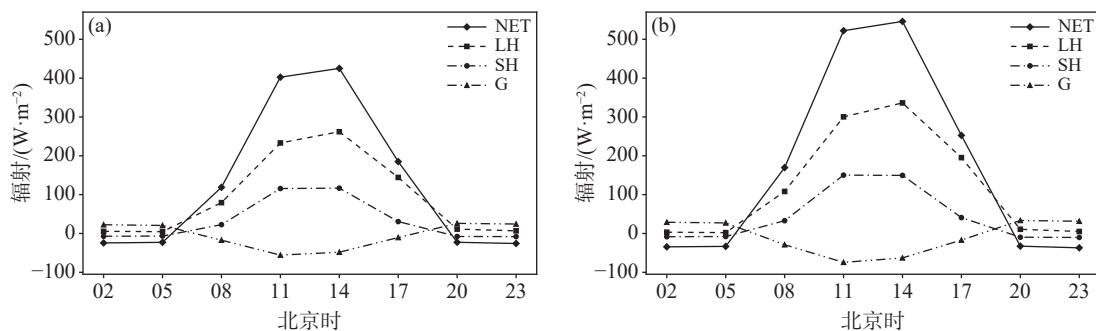


图8 同图7,但为全天空(a)和晴空(b)条件下的日变化

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the diurnal cycle under (a) all-sky and (b) clear-sky conditions

3.3 水体储热的计算及变化特征

通常三峡库区内水体无固体土壤层,不存在土壤热传导过程,也就代表水体无土壤热通量,取而代之的为水体储热,水体因其热容量较大,通过吸收或释放热量导致自身温度发生变化(Vanderkelen et al., 2021)。图9给出三峡库区所有格点2013—2022年历年夏季平均地表能量平衡的六边形分箱图,横坐标为地表净长波辐射与净短波辐射之和(即净辐射),纵坐标为感热、潜热及土壤热通量之和。三峡库区内大部分地表类型仍为陆地,因此绝大部分格点仍保持净辐射等于地表净长波与净短波之和,且等价于感热、潜热及土壤热通量之和,即图中对角线上代

表高密度数据分布的红色区域,净辐射的范围一般在 $100\sim 150\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,与图6中呈现的结论一致。此外,对角线两侧的蓝色格点虽然分布较广,但密度较低、数据量较小,表示三峡库区包含水体在内的非均质地表的净辐射能量并非全部分配给了感热、潜热和土壤热通量,这一部分损失的能量即为储热。

观测或模式中均无法直接得到水体储热,但可根据地表能量平衡差值法间接计算得出(姚灵烨等,2023)。因此,筛选出三峡库区内下垫面类型为水体的格点,通过模拟的净辐射减去感热与潜热之和的差值,计算得到水体储热,图10为三峡库区内水体格点平均储热在晴空和全天空条件下的昼夜变化。

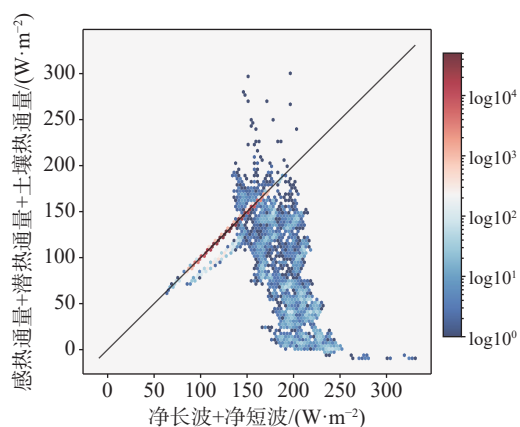


图 9 2013—2022 年夏季平均三峡库区所有格点地表能量平衡的六边形分箱

Fig. 9 Hexbin plot of surface energy balance over the Three Gorges Reservoir Area during summer (2013–2022)

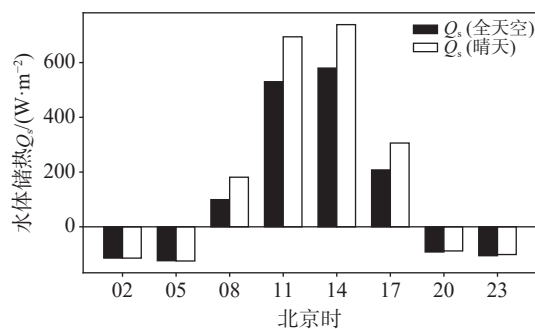


图 10 2013—2022 年三峡库平均水体储热 (Q_s) 日变化柱状图
Fig. 10 Bar chart for the diurnal variation of water heat storage (Q_s) over the Three Gorges Reservoir Area from 2013 to 2022

从中可见, 日出后, 水体吸收了相当部分的太阳辐射能量, 太阳辐射累积超过湍流耗散, 从夜晚的释放能量转变为储存能量, 并在 14 时达到峰值; 日落后湍流通量减弱, 储存热量通过向上长波辐射主导释放, 晴空和全天空条件下均表现出这一变化特征。夜间全天空和晴空的水体储热基本相当, 但白天晴空条件下水体储热要高于全天空 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上, 中午时段尤为突出, 这主要受益于无云条件下短波辐射增加。水体的向下长波/短波辐射与陆地相比变化不大, 向上短波辐射要低于周边陆地, 因为水体反照率更低; 同时由于水体储热较大、夜间温度较高以及三峡河谷的特殊地形, 均导致水体向上长波辐射较大。综上所述, 三峡库区夏季水体面积扩大后, 会导致区域内水体储热显著增加, 改变净辐射的能量分配去向, 进而对局地气候产生影响。

4 结论与讨论

通过国产再分析资料 CRA-40 驱动 WRF 区域气候模式, 开展了 2013—2022 年三峡库区夏季高精度

气候模拟, 通过研究三峡库区地表辐射的变化, 分析库区地表能量收支特征, 得出如下主要结论:

(1) WRF 模式能较好地再现三峡库区地表气温和辐射的时空分布特征。对比模拟结果与 ERA5 再分析资料及站点观测数据, 尽管对辐射值存在系统性高估, 但模式能较好捕捉到复杂地形下的温度场细节和辐射的日变化趋势。

(2) 云层对地表辐射能量分配具有关键的调控作用。晴空条件下地表向下短波辐射和净短波辐射相较于全天空条件平均分别高出 $70 \sim 130 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $50 \sim 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。云层通过削减太阳辐射, 显著抑制了感热和潜热通量, 重构了区域能量分配格局。

(3) 三峡库区夏季地表能量分配以潜热通量为主导。净辐射与潜热通量的变化高度同步, 且均表现出显著的季节内变化和昼夜变化特征, 峰值分别出现在 7 月末至 8 月初和白天午后, 能量主要用于蒸散过程。全天空下潜热通量呈微弱下降趋势, 而晴空下上升趋势相对明显 ($0.68 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 这反映了云层削减辐射对蒸散的抑制以及水域扩大对蒸发潜热的可能影响。

(4) 水库水体对区域能量平衡具有重要影响。水体热容量大, 其储热效应显著, 尤其在晴空白天的中午时段, 水体储热可达 $650 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上。这一过程改变了净辐射的能量分配去向, 是库区局地气候效应的重要组成部分。

本文定量揭示了三峡库区地表能量收支的时空变化规律, 强调了云-辐射-下垫面相互作用的核心地位, 为深入理解三峡工程的气候与环境效应提供了重要依据。同时针对 WRF 模式传统陆面过程方案因忽略水体湍流储热机制而在三峡库区水体能量闭合误差较大的情况, 量化了水体储热, 为开发水-陆耦合模块提供了基础依据, 进而有助于提高模式的准确度和可靠性。需要指出的是, 本文的结论主要是基于数值模拟结果而得出的, 不同参数化方案选择、下垫面的精细程度、初始场和边界场等因素都会对模式模拟结果产生一定影响。此外, 下一步可通过扩宽水体面积、抬升水位高度, 刻画三峡水库蓄水相关的陆面参数变化, 开展敏感性试验, 进行更长时间尺度的气候模拟, 从气候尺度分析辐射分量的变化趋势以及云的影响, 深入分析库气候效应的影响范围和物理机制。

参考文献 (References):

- 艾泽, 常蕊, 肖潺, 等. 2023. 模拟分析揭示三峡水库成库以来的气候效应: 局地 and 近地层, 而不是区域[J]. 湖泊科学, 35(2): 709–721. Ai Z,

- Chang R, Xiao C, et al. 2023. Simulated climate effect of the Three Gorges Reservoir after its completion: Within surface and local scope instead of regional [J]. *Journal of Lake Sciences*,35(2):709–721 (in Chinese) doi:10.18307/2023.0227
- 程学军,付重庆,肖潇,等.2024.三峡库区河流水体碳变化驱动力分析[J]. *长江科学院院报*,41(12):66–72. Cheng X J, Fu C Q, Xiao X, et al. 2024. Drivers for carbon variation of river in Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 41(12):66–72 (in Chinese). doi:10.11988/ckyyb.20230911
- 杜碧莹,王文婷,杨阳,等.2025.三峡水库对局地气候的影响研究[J]. *水资源与水工程学报*,36(3):108–115. Du B Y, Wang W T, Yang Y, et al. 2025. Effect of the Three Gorges Reservoir on the local climate [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*,36(3): 108–115 (in Chinese). doi:10.11705/j.issn.1672–643X.2025.03.13
- 李强,李永华,周锁铨,等.2011.基于WRF模式的三峡地区局地下垫面效应的数值试验[J]. *高原气象*,30(1):83–93. Li Q, Li Y H, Zhou S Q, et al. 2011. Numerical experimentation of local underlying surface effect based on WRF model in Three Gorges area [J]. *Plateau Meteorology*,30(1):83–93 (in Chinese)
- 李艳,高阳华,陈鲜艳,等.2011.三峡下垫面变化对区域气候效应的影响研究[J]. *南京大学学报(自然科学版)*,47(3):330–338. Li Y, Gao Y H, Chen X Y, et al. 2011. The impact of the land use change associated with the Three Gorges Dam on regional climate change [J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*,47(3):330–338 (in Chinese). doi:10.13232/j.cnki.jnju.2011.03.008
- 卢楚翰,黄丁安,秦育婧,等.2024.西南地区东部夏季降水转化率特征及成因分析[J]. *暴雨灾害*,43(5):499–508. Lu C H, Huang D A, Qin Y J, et al. 2024. Characteristics and cause analysis of summer precipitation conversion rate in eastern Southwest China [J]. *Torrential Rain and Disasters*,43(5):499–508 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–010
- 孙晨,刘敏.2018.再分析资料在三峡库区气候效应研究中的应用[J]. *长江流域资源与环境*,27(9):1998–2013. Sun C, Liu M. 2018. Applications of reanalysis data in the study of climate effect over the Three Gorges Reservoir area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,27(9):1998–2013 (in Chinese). doi:10.11870/cjlyzyy-hj201809011
- 王冠添,胡泽勇,孙根厚,等.2023.那曲地区不同季节陆面过程与大气边界层演变耦合关系的对比分析[J]. *高原气象*,42(6):1361–1371. Wang G T, Hu Z Y, Sun G H, et al. 2023. Comparative analysis of coupling relationship between land surface processes and atmospheric boundary layer evolution in Nagqu area in different seasons [J]. *Plateau Meteorology*,42(6):1361–1371 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2023.00020
- 王秋艳.2024.东亚陆地辐射收支评估及其影响因子研究[D].南京:南京信息工程大学. Wang Q Y. 2024. An assessment of land radiative energy balance over East Asia and study of its potential factors [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, (in Chinese)
- 吴佳,高学杰,张冬峰,等.2011.三峡水库气候效应及2006年夏季川渝高温干旱事件的区域气候模拟[J]. *热带气象学报*,27(1):44–52. Wu J, Gao X J, Zhang D F, et al. 2011. Regional climate model simulation of the climate effects of the Three Gorge Reservoir with specific application to the summer 2006 drought over the Sichuan-Chongqing area [J]. *Journal of Tropical Meteorology*,27(1):44–52 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–4965.2011.01.005
- 杨溯,石广玉,王标,等.2013.1961—2009年我国地面太阳辐射变化特征及云对其影响的研究[J]. *大气科学*,37(5):963–970. Yang S, Shi G Y, Wang B, et al. 2013. Trends in Surface Solar Radiation (SSR) and the effect of clouds on SSR during 1961–2009 in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,37(5):963–970 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2013.11122
- 杨扬,杨启东.2024. Noah-MP 陆面模式对干旱区不同下垫面水热通量模拟评估[J]. *沙漠与绿洲气象*,18(1):28–37. Yang Y, Yang Q D. 2024. Assessment of the Noah-MP land surface model simulation performance on the water and heat fluxes of the different underlying [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,18(1):28–37 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2024.01.004
- 姚灵烨,许亘昱,赵立华.2023.湿热地区城市静态水体能量分配特征研究——以广州荔湾湖为例[J]. *西部人居环境学刊*,38(6):9–14. Yao L Y, Xu G Y, Zhao L H. 2023. Characteristics of energy partitioning of static urban water bodies in hot-humid regions: a case study of Liwan lake in Guangzhou [J]. *Journal of Human Settlements in West China*,38(6):9–14 (in Chinese). doi:10.13791/j.cnki.hsfwest.20230602
- 姚思源,赖欣,张哲浩,等.2025.青藏高原阿里地区土壤冻融过程地表水热交换特征分析[J]. *高原山地气象研究*,45(3):48–55. Yao S Y, Lai X, Zhang Z H, et al. 2025. Analysis of surface water-heat exchange characteristics during the soil freeze–thaw process in the Ali area of the Tibetan Plateau [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 45(3): 48–55 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–2184.2025.03.005
- 张戈,赖欣,刘康.2023.黄河源区玛曲土壤冻融过程中地表水热交换特征分析[J]. *高原气象*,42(3):575–589. Zhang G, Lai X, Liu K. 2023. Characteristics of surface water and heat exchange during soil freezing and thawing of Maqu station in the source area of the Yellow River [J]. *Plateau Meteorology*,42(3):575–589 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2022.00083
- 张静,刘增进,肖伟华,等.2019.三峡水库蓄水后库区气候要素变化趋势分析[J]. *人民长江*,50(3):113–116. Zhang J, Liu Z J, Xiao W H, et al. 2019. Analysis on variation trend of climate factors in Three Gorges Reservoir area after impoundment [J]. *Yangtze River*,50(3):113–116 (in Chinese). doi:10.16232/j.cnki.1001–4179.2019.03.020
- 张萍,张进,翁白莎.2024.三峡库区流域生态系统稳定性演变评估[J]. *人民长江*,55(6):60–67. Zhang P, Zhang J, Weng B S. 2024. Assessment of ecosystem stability evolution in Three Gorges Reservoir Basin [J]. *Yangtze River*,55(6):60–67 (in Chinese). doi:10.16232/j.cnki.1001–4179.2024.06.009
- 张天宇,王雨潇,孙营营,等.2023.1998—2020年三峡库区小时极端降水时空变化特征分析[J]. *高原气象*,42(1):108–115. Zhang T Y, Wang Y X, Sun Y Y, et al. 2023. Temporal and spatial variation characteristics of hourly extreme precipitation in the Three Gorges region in 1998–2020 [J]. *Plateau Meteorology*,42(1):108–115 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2022.00019
- 赵子皓,江晓东,杨沈斌.2022.三峡蓄水对局地气候变化的影响[J]. *长江科学院院报*,39(6):40–49. Zhao Z H, Jiang X D, Yang S B. 2022. Impact of water storage in Three Gorges Reservoir on local climate change [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 39(6):40–49 (in Chinese). doi:10.11988/ckyyb.20210221

- 郑衍欣,李双林,张超.2018.三峡库区春季连阴雨气候趋势分析[J].*暴雨灾害*,37(4):364–372. Zheng Y X, Li S L, Zhang C. 2018. Climatic trend analysis of consecutive rainfall events in spring over Three Gorges Reservoir Area [J]. *Torrential Rain and Disasters*,37(4): 364–372 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.04.009
- Degu A M, Hossain F, Niyogi D, et al. 2011. The influence of large dams on surrounding climate and precipitation patterns [J]. *Geophysical Research Letters*, 38(4). doi:10.1029/2010GL046482
- Jiang G, Lyv J, He X, et al. 2022. Influence of reservoir impoundment on rainfall erosivity in the three gorges reservoir region of China [J]. *Hydrology Research*,53(11):1357–1371. doi:10.2166/nh.2022.038
- Li X, Sha J, Wang Z L. 2021. Influence of the three gorges reservoir on climate drought in the yangtze river basin [J]. *Environmental Science and Pollution Research*,28(23):29755–29772. doi:10.1007/s11356-021-12704-4
- Liu Z, Jiang L, Shi C, et al. 2023. CRA-40/atmosphere—the first-generation Chinese atmospheric reanalysis (1979–2018): System description and performance evaluation [J]. *Journal of Meteorological Research*,37(1):1–19. doi:10.1007/s13351-023-2086-x
- Loza A R A, Fidélis T. 2021. Literature review on the analysis of climate change risks in the environmental impact assessment of dams [J]. *Impact Assessment and Project Appraisal*,39(4):277–289. doi:10.1080/14615517.2021.1893928
- Pokhrel Y, Burbano M, Roush J, et al. 2018. A review of the integrated effects of changing climate, land use, and dams on Mekong river hydrology [J]. *Water*,10(3):266. doi:10.3390/w10030266
- Simonet G, Oettl D, Lehner M. 2023. The performance of GRAMM-SCI and WRF in simulating the surface-energy budget and thermally driven winds in an alpine valley [J]. *Boundary-Layer Meteorology*,189(1-3):251–280. doi:10.1007/s10546-023-00835-9
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2019. A description of the advanced research WRF model version 4 [R]. Boulder, CO, USA: National Center for Atmospheric Research, NCAR/TN-556+STR. doi:10.5065/1dfh-6p97
- Vanderkelen I, Van Lipzig N P M, Sacks W J, et al. 2021. Simulating the impact of global reservoir expansion on the present-day climate [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,126(16): e2020JD034485. doi:10.1029/2020JD034485
- Wild M. 2017. Progress and challenges in the estimation of the global energy balance [J]. *AIP Conference Proceedings*,1810:020004. doi:10.1063/1.4975500
- Zhao Y Y, Liu S N, Shi H Y. 2021. Impacts of dams and reservoirs on local climate change: a global perspective [J]. *Environmental Research Letters*,16(10):104043. doi:10.1088/1748-9326/ac263c
- Zhou Z, Chen S, Li Z, et al. 2023. An evaluation of CRA40 and ERA5 precipitation products over China [J]. *Remote Sensing*,15(22):5300. doi:10.3390/rs15225300

(责任编辑 杨 浩)