

基于 MODIS 遥感影像的太湖表层水温演变及归因分析

马卫国,王远坤,陶家欣

(华北电力大学水利与水电工程学院,北京 102206)

摘要:基于 MODIS 遥感影像获取 2002—2020 年太湖表层水温数据,分析了太湖表层水温在不同时间尺度上的空间分布特征和变化趋势以及主要水文气象因子的演变规律,探究了各因子的突变特征,并从多时间尺度出发探讨了太湖表层水温变化的主要驱动因子。研究结果表明:梅梁湾、西部沿岸、南部沿岸、湖心区表层水温呈显著上升趋势,贡湖与东太湖的部分区域则呈显著下降趋势;太湖低温区随季节呈规律性迁移,春季至秋季低温区由湖心区南移并逐渐扩展至胥湖及太湖南部沿岸,秋冬季向湖心区回迁;太湖表层水温变化的主要驱动因子为近地表气温、风速及相对湿度,年尺度上太湖表层水温主要受近地表气温与风速的影响,春季和夏季近地表气温是太湖表层水温变化的主要驱动因子,秋季主要驱动因子为近地表气温与风速,冬季近地表气温、风速及相对湿度的变化均对太湖表层水温影响较大。

关键词:MODIS 遥感影像;表层水温;水文气象因子;驱动机制;太湖

中图分类号:TV882.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0259-10

Study on evolution and attribution of Taihu Lake surface water temperature based on MODIS remote sensing images//MA Weiguo, WANG Yuankun, TAO Jiaxin (College of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Based on MODIS remote sensing images, surface water temperature data of the Taihu Lake from 2002 to 2020 were obtained. The study examined the spatial distribution characteristics of the Taihu Lake's surface water temperature across different time scales, analyzed the variation trends of the lake's surface water temperature and main hydro-meteorological factors, explored the abrupt change characteristics of each factor, and discussed the main driving factors of changes in the lake's surface water temperature from a multi-time scale perspective. The results show that: the surface water temperature in Meiliang Bay, the western coast, the southern coast, and the central lake area exhibited a significant upward trend, while some areas of Gonghu Lake and East Taihu Lake showed a significant downward trend. The low-temperature areas of the Taihu Lake migrate regularly with seasons: from spring to autumn, the low-temperature areas move southward from the central lake area and gradually expand to Xu Lake and the southern coast of Taihu Lake, and migrate back to the central lake area in autumn and winter. The main driving factors for changes in Taihu Lake's surface water temperature are near-surface air temperature, wind speed, and relative humidity. On the annual scale, the surface water temperature of Taihu Lake is mainly affected by near-surface air temperature and wind speed; in spring and summer, near-surface air temperature is the main driving factor for changes in the lake's surface water temperature; in autumn, the main driving factors are near-surface air temperature and wind speed; in winter, changes in near-surface air temperature, wind speed, and relative humidity all have a significant impact on the lake's surface water temperature.

Key words: MODIS remote sensing images; surface water temperature; hydro meteorological factors; driving mechanisms; Taihu Lake

湖泊是生物多样性的**重要支撑**,其对全球气候变化的响应直接影响了区域的生态平衡与人类活动^[1]。在气候变暖的背景下,全球多数湖泊表层水温每 10 a 以 0.30℃ 的速率上升,这一变化会引发湖底缺氧,并加剧湖泊水体的富营养化程度^[2]。湖泊作为水循环中的重要环节,其表层水温是影响湖泊

基金项目:国家自然科学基金项目(52279064)
作者简介:马卫国(2002—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:120242238007@ncepu.edu.cn
通信作者:王远坤(1981—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:yuankunw@ncepu.edu.cn

水生生态系统的关键因素^[3],监测湖泊表层水温、探究其变化成因机制,对于改善湖泊水环境和区域生态环境具有重要意义^[4]。

20 世纪 90 年代以来,太湖水质持续下降、水温不断升高、富营养化程度逐步加重,蓝藻水华暴发的面积与频次也随之增加^[5],不仅造成上亿元的经济损失,还引发了数百万居民的饮水危机^[6]。叶羽婷等^[7]指出,太湖表层水温与湖泊富营养化存在显著相关性,因此,解析太湖表层水温的动态变化、探究其驱动机制,对实现太湖流域可持续发展尤为重要。传统水温监测方法^[8]存在空间覆盖度不足、观测时序不连续等问题,而遥感技术凭借其大范围同步观测能力与实时性等优势,更利于研究太湖表层水温的时空变化。利用遥感影像获取湖泊表层水温的主流数据源有 Landsat 与 MODIS;Landsat 卫星^[9]时间分辨率较低(16 d 重访周期),其数据难以构建连续的月均与年均水温序列^[10];而 MODIS 遥感影像具有 1 km 的空间分辨率与较短重访周期,在数据获取精度方面更具优势,其温度产品 MOD11A2 通过劈窗算法^[11]获取水体温度。劈窗算法可以消除水汽与 CO₂ 对热红外波段辐射传输的影响,更精准地从卫星数据中提取地表温度信息,已广泛应用于温度数据的长时序变化特征研究中^[12]。Peng 等^[13]利用 MOD11A2 获取了中国五大湖表层水温数据,结果表明,湖泊表层水温在长时间尺度上受全球气候变化影响;Zhang 等^[14]利用 MOD11A2 研究了青藏高原 52 个典型湖泊,指出近地表气温是湖泊表层水温变化的主要驱动因素。目前,针对湖泊表层水温驱动因素的研究多集中于单一因子的定性分析,得出地表气温与湖泊表层水温相关性较强,而降水通过影响地表温度进而影响湖泊表层水温^[15],风速通过影响湖区蒸散发改变湖泊表层水温的变化趋势^[16]等结论。Schmid 等^[17]指出,太阳辐射是影响 Zurich 湖表层水温的主要因素之一。针对太湖流域,现有研究多基于水文站点的实测数据,探讨点状水温数据与太湖富营养化、藻类暴发之间的关系^[18],而针对太湖表层水温变化的长时间序列研究及自然因素对其驱动程度的量化研究均较为薄弱。

基于此,本文通过 MODIS 遥感影像获取长时间序列太湖表层水温数据,探究了 2002—2020 年太湖表层水温与水文气象因子的演变特征,开展了太湖表层水温演变的归因研究,量化了各水文气象因素对太湖表层水温变化的驱动程度,进而揭示其驱动机制,以期为实现太湖生态环境的可持续发展、提升太湖流域的水资源保障能力提供参考。

1 研究区概况

太湖是中国五大淡水湖之一,属于典型的浅水湖泊^[19],位于长江三角洲中部(30°05′40″N~31°22′58″N,119°52′32″E~120°36′10″E),是长江流域的重要组成部分。湖区面积约 3 192 km²,水体面积约 2 338.1 km²,平均水深为 1.89 m。根据自然条件和水环境指标,太湖被划分为梅梁湾、竺山湖、西部沿岸、湖心区、贡湖、南部沿岸、胥湖、箭湖东茭咀和东太湖 9 个湖区(图 1)^[20]。太湖流域属于亚热带季风气候,四季分明;夏季东南风盛行,气候炎热多雨,冬季寒冷干燥,降水呈现显著的季节性变化。太湖自 1980 年起出现富营养化,尽管已实施一系列保护措施,但蓝藻水华现象仍时有发生^[21]。

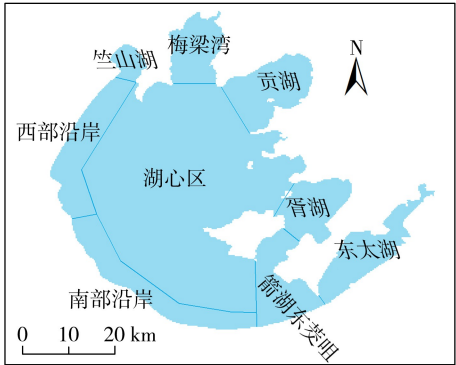


图 1 太湖流域概况

Fig. 1 Overview of the Taihu Lake Basin

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

2.1.1 太湖表层水温遥感数据

太湖边界数据来源于地球资源卫星系统 Landsat 系列卫星。Landsat-8/OLI 遥感影像数据自 2013 年 3 月 18 日开始记录,时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 30 m,满足了太湖表层水温研究的精度需求。水体提取的研究时段选定为 2013 年 3 月 18 日至 2020 年 12 月 31 日,基于 Landsat-8/OLI 遥感影像数据,采用归一化差异水体指数法^[22-23],通过设定水体出现频率大于等于 95% 的阈值(即该像元在全部有效观测中,至少 95% 的时次被识别为水体),提取太湖的稳定固态水体边界。

2002—2020 年太湖表层水温数据通过 MODIS 遥感影像获取,数据来源于谷歌地球引擎中 MODIS 的温度产品 MOD11A2,空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 7 d。提取流程为:①在谷歌地球引擎平台中,通过 MOD11A2 导出 2002—2020 年太湖流域 LST_Day_1 km 图层,每年 46 幅影像,共计 874 幅影

像;②基于 LST_Day_1 km 图层的有效值范围(7 500~65 535),去除表层水温的无效值,筛选出 2002—2020 年质量较差的影像,利用 ArcGIS 焦点统计工具,计算缺失像元点周围 8 像素的平均值,并填充至该像元;③将遥感影像像元值转化为摄氏温度值($T_w = 0.02D_N - 273.15$,其中 T_w 为表层水温摄氏温度值, D_N 为遥感影像像元值);④利用太湖边界数据进行裁剪,获取 2002—2020 年高精度的太湖表层水温数据。

2.1.2 水文气象数据

近地表气温、地温、风速、降水、气压、相对湿度以及日照时长等水文气象数据均来自于中国气象科学数据科学中心 (<http://data.cma.cn/>),各资料时段为 2002—2020 年的逐日数据。太湖面积广阔,考虑局地气候差异,选取无锡站(58 354)、湖州站(58 450)以及苏州站(58 349)作为不同湖区的气象代表站。太阳辐射值由日照时长通过逐日太阳辐射模拟计算方法^[24]得到,计算公式为

$$H = H_L(\alpha + \varepsilon S/S_L) \tag{1}$$

式中: H 为日实测总辐射; H_L 为晴天状态下的日总辐射; S 、 S_L 分别为日照时数和日长; α 、 ε 为经验参数。该方法模拟得到的 H 与多年实际观测最大值基本一致,模拟值与实测值之间相关性显著(相关系数为 0.81~0.93),平均偏差为 0.77。

2.2 研究方法

太湖水温演变及归因研究框架如图 2 所示。分析步骤如下:①基于 MOD11A2 遥感影像数据获取 2002—2020 年太湖表层水温数据,分析太湖表层水温在不同时间尺度上的空间分布特征;②采用一元线性拟合、Mann-Kendall (M-K) 趋势检验法^[25]、变异

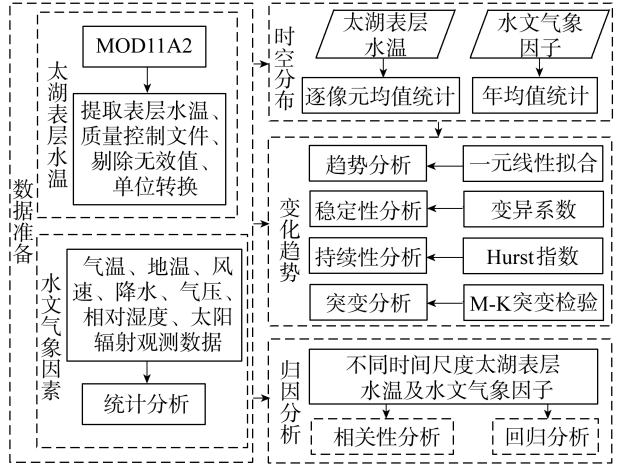


图 2 太湖表层水温演变及归因研究框架

Fig.2 Research framework for evolution and attribution of Taihu Lake surface water temperature

系数、Hurst 指数^[26]以及 M-K 突变分析法^[27],探究各因子的演变特征;③从多时间尺度出发,运用相关性分析^[28]与回归分析^[29]等方法辨识太湖表层水温变化的主要驱动因子。

2.2.1 演变特征分析

将太湖表层水温、相关水文气象因子数据与时间序列进行回归拟合,得到不同数据的年均变化率:

$$X = a + bt + e \tag{2}$$

式中: X 为各水文气象因子的观测值; a 为截距; b 为年均变化率; e 为残差; t 为时间。

针对太湖表层水温的二维空间影像,利用 M-K 趋势检验法^[25]对太湖表层水温栅格影像的增减趋势进行判断,并进行显著性检验。

利用变异系数(标准差与平均值的比值)描述太湖表层水温以及水文气象因子的变幅与稳定性,通过计算历年不同数据的标准差与平均值来计算其变异系数。Hurst 指数基于变标度极差分析法^[26]计算得出,利用 Hurst 指数对水文气象因子数据的持续性特征^[30]进行定量研究,通过 M-K 突变检验法^[27]分析水文气象因子在 2002—2020 年的突变点。

2.2.2 驱动归因分析

Pearson 相关系数被广泛运用于衡量两个连续变量间线性关系的强度^[28]。通过计算太湖表层水温以及水文气象因子间的相关系数,判断各变量之间的相关关系;利用多元线性回归模型^[29]分析太湖表层水温变化的驱动力。设太湖表层水温为因变量 T_w ,以水文气象因子为自变量构建回归模型:

$$T_w = a + b_1T_a + b_2W + b_3P_e + b_4P_s + b_5S_r + b_6R_h + e \tag{3}$$

式中: T_a 为近地表气温; W 为风速; P_e 为降水量; P_s 为气压; S_r 为太阳辐射; R_h 为相对湿度。

通过拟合度 R^2 统计回归模型的拟合效果,利用 ΔR^2 描述自变量对因变量的贡献率:

$$R^2 = 1 - S_e/S_l \tag{4}$$

$$\Delta R^2 = R_1^2 - R_2^2 \tag{5}$$

式中: S_e 为残差平方和; S_l 为总离差平方和。加入新自变量后的 R_1^2 与未加入变量前的原始 R_2^2 的差值即为新加入自变量对太湖水温的解释程度。

3 结果与分析

3.1 太湖水温时空分布特征

2002—2020 年太湖月均表层水温空间分布见图 3,太湖表层季均水温空间分布见图 4。

太湖多年表层月均水温为 6.1~35.2℃,1—

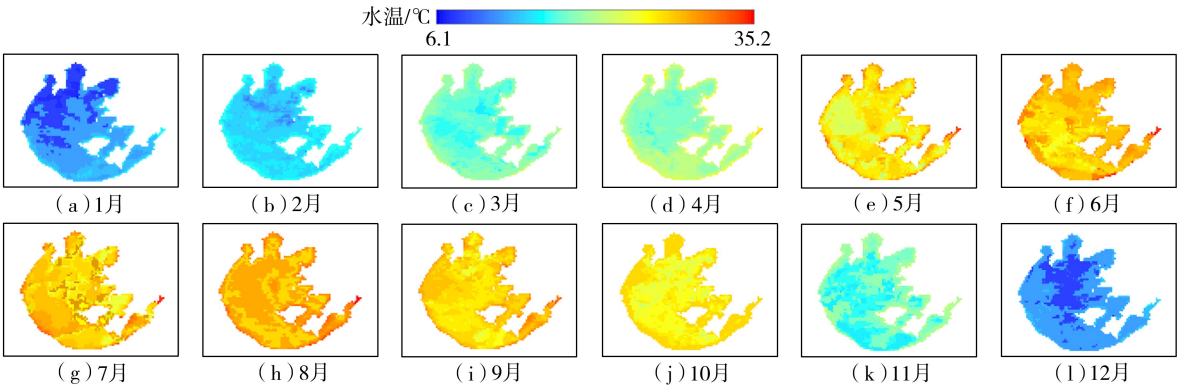


图 3 太湖表层月均水温空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of monthly average surface water temperature in Taihu Lake

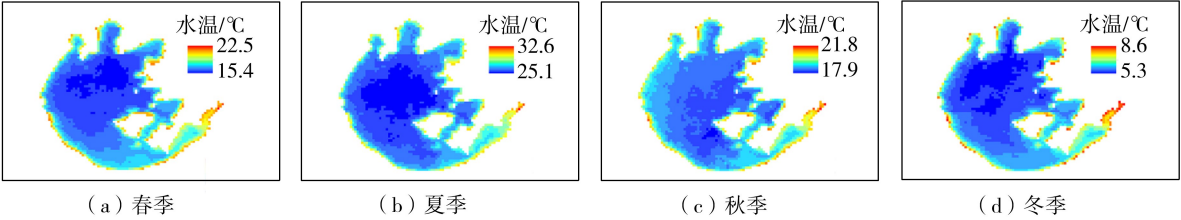


图 4 太湖表层季均水温空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of seasonal average surface water temperature in Taihu Lake

8 月为增温期,低温区从北向南由梅梁湾向湖心区靠近;9—12 月为降温期,低温区由南部沿岸向湖心区偏移,月尺度中东太湖平均水温最高,竺山湖最低。

在季节尺度上,春季、夏季以及冬季的多年季平均最低水温均出现在湖心区,分别为 15.4、25.1、5.3℃;而秋季低温区向南转移至南部沿岸区域,多年季平均最低水温为 17.9℃。春、夏、秋、冬多年季平均最高水温均出现在东太湖,分别为 22.5、32.6、21.8、8.6℃。春季太湖 9 个湖区表层年均水温温差最大,湖区间年均温差达 2.29℃,而冬季最小。太湖低温区迁移轨迹存在规律性特征,春季至夏季,低温区由湖心区向南部沿岸移动;夏季至秋季,低温区由湖心区向南部沿岸、胥湖区域移动;秋季至冬季,低温区由南部沿岸向西部沿岸、湖心区移动,低温区重新聚集于湖心区。

太湖 5 个典型湖区表层年均水温变化特征见图 5。东太湖始终维持全湖最高水温,年均水温为 16.57~19.16℃,年均最高水温出现在 2019 年;贡湖与东太湖的温度曲线具有一致性,整体偏低 0.4~1.1℃;湖心区水温低于其他区域,年均水温为 14.49~17.67℃,在 2011 年出现观测周期最低值 14.49℃;南部沿岸与湖心区温度特征相似,均在 2008—2009 年出现一次异常升温情况。太湖在 2011 年出现低温谷值(东太湖 16.57℃,湖心区 14.49℃),此后进入增温期;自 2010 年湖区间温度

差增大。

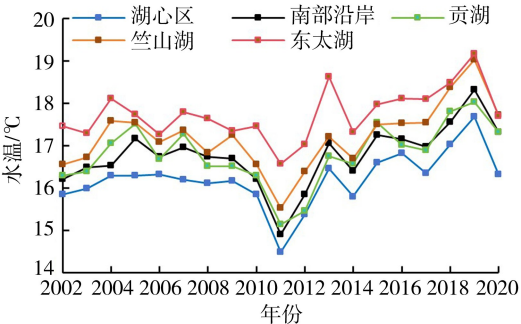


图 5 太湖 5 个典型湖区表层年均水温变化
Fig. 5 Changes in annual average surface water temperature in five typical lake areas of Taihu Lake

太湖表层年均水温空间分布见图 6。基于 MOD11A2 遥感影像数据,太湖表层最高年均水温出现在 2019 年,为 19.16℃,较多年平均值(17.75℃)偏高 1.41℃;最低年均水温出现在 2011 年,为 16.56℃,与最高年均水温相差 2.60℃。太湖表层年均水温的高温区具有稳定性,主要分布在东太湖、贡湖,其中东太湖的多年年均水温平均值为 17.75℃,为全湖最高。基于太湖表层水温数据,竺山湖与湖心区构成了太湖区域的低温核心区。湖心区表层多年平均水温为 16.23℃,为太湖最低值;年均最低水温出现在 2011 年,为 14.49℃,较多年平均水温偏低 1.74℃。太湖表层水温整体呈上升趋势,而低温区在 2015 年前后发生转变。2014 年之前,低温区多出现在竺山湖、湖心区,2015 年之后多

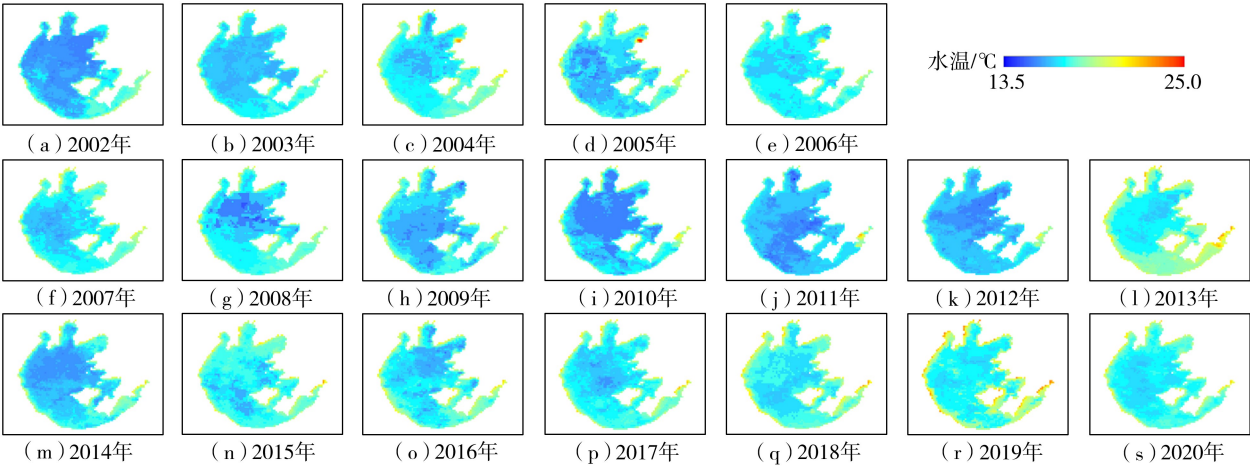


图 6 太湖表层年均水温空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of annual average surface water temperature in Taihu Lake

出现在南部沿岸。2016—2020 年,太湖表层水温持续呈现从北向南的迁移趋势。

3.2 演变特征分析

3.2.1 趋势分析

太湖表层年均水温 M-K 趋势检验结果见图 7,可见超过 98% 的像元点水温在 2002—2020 年呈上升趋势。空间分布上,太湖梅梁湾表层年均水温呈极显著的上升趋势,西部、南部沿岸呈显著上升趋势,湖心区水温呈微显著上升趋势,仅贡湖、东太湖存在少部分微显著降温区域。

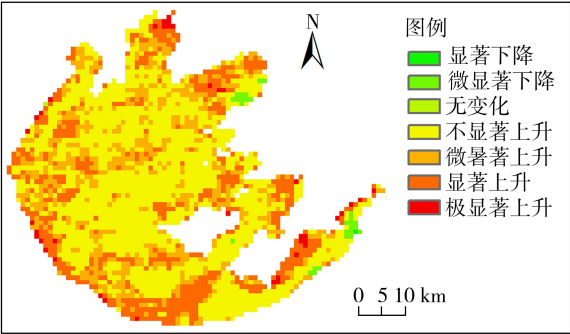


图 7 太湖表层水温变化 M-K 趋势检验

Fig. 7 M-K test of variation trend of surface water temperature in Taihu Lake

在气候变暖背景下,各水文气象因子存在不同程度的年际差异。2002—2020 年太湖表层水温及水文气象因子年际变化呈上升的趋势(表 1),水温

表 1 2002—2020 年水文气象因子年均变化趋势

Table 1 Annual average variation trends of hydro-meteorological factors from 2002 to 2020

因子	水温/℃	地温/℃	气温/℃	气压/kPa	降水/mm	风速/(m/s)	太阳辐射/(W/m ²)	相对湿度/%
平均值	17.75	19.06	17.19	101.60	1222.60	2.44	14.09	71.89
最大值	19.61	19.88	17.79	102.20	1890.40	2.93	15.52	76.68
最小值	16.56	18.35	16.55	101.50	948.20	2.02	12.69	67.93
变化率	0.50	0.40	0.18	0.11	24.10	-0.42	-0.85	0.50

注:变化率为每 10a 的数据。

平均升温速率每 10 a 为 0.50℃。各水文气象因子以降水、地温持续升高、气温缓慢上升(速率每 10 a 为 0.18℃),风速、太阳辐射持续下降为主要特征,太湖相对湿度线性变化趋势不明显。

3.2.2 稳定性分析

2002—2020 年太湖表层水温及水文气象因子变异系数空间分布见图 8。太湖降水量的波动最为明显,而气压特征则相对稳定;风速呈明显的下降趋势,但其变异系数为 0.214,波动程度较高;相对湿度无明显变化趋势,数值相对稳定,变异系数为 0.072;水温、地温、近地表气温的变异系数值相近。通过逐像元分析,太湖 9 个湖区表层年均水温最高变

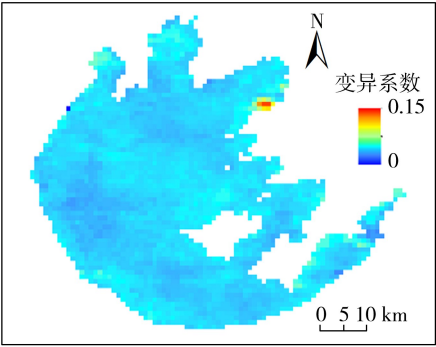


图 8 太湖表层水温变异系数空间分布特征

Fig. 8 Coefficient of variation and spatial distribution characteristics of surface water temperature in Taihu Lake

异系数数值位于贡湖区域,为 0.14,其余区域在 0.08 左右,说明 19 年间太湖区域水温波动程度较小。

3.2.3 持续性分析

基于持续性分析,发现 2002—2020 年太湖表层水温及水文气象因子的 Hurst 指数值均大于 0.5 (图 9),表明在未来一段时间内将延续过去 19 年的趋势。其中,相对湿度、风速、气温的 Hurst 指数值大于 0.8,具有很强的持续性,即相对湿度、气温将呈增加的趋势,风速呈持续降低趋势,且持续性很强;地温、太阳辐射、降水的 Hurst 指数值在 0.75~0.80 之间,具有强持续性,表明地温、降水将保持增加趋势,太阳辐射强度持续减小;水温、气压的 Hurst 指数值在 0.65~0.75 之间,具有较强的持续性。此外,通过逐像元分析,计算 2002—2020 年太湖水温的 Hurst 指数值,发现太湖大部分区域表层水温将延续过去 19 年的升温趋势,仅贡湖、东太湖存在少部分降温区域。

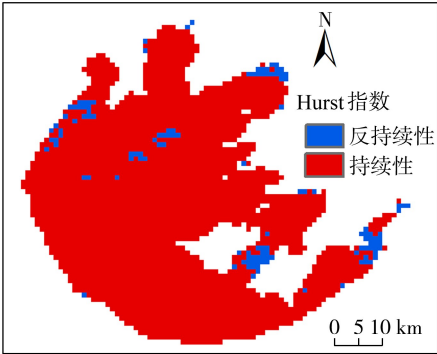


图 9 太湖表层水温 Hurst 指数值及空间分布特征
Fig.9 Hurst index values and spatial distribution characteristics of surface water temperature in Taihu Lake

3.2.4 突变分析

2002—2020 年太湖表层水温及各水文气象因子的突变年分别为:水温 2003 年和 2015 年;气温 2003 年、2005 年、2007 年和 2016 年;地温 2005 年、2006 年、2009 年和 2019 年;气压 2010 年、2011 年和 2012 年;相对湿度 2015 年、2016 年和 2019 年;太阳辐射 2006 年、2009 年、2010 年、2012 年和 2013 年;降水 2011 年;风速 2013 年。各气候因子的突变年份主要集中于 2003—2007 年和 2009—2013 年。其中,太湖表层水温与近地表气温的突变时间较为接近,均在 2003 年;地温与近地表气温在 2006 年前后共出现 4 次突变;气压、太阳辐射及降水的突变集中发生在 2011 年前后,而相对湿度的突变则主要出现在 2015 年之后。此外,降水与风速分别仅发生 1 次突变,分别为 2011 年和 2013 年。

3.3 驱动机制

3.3.1 相关性分析

太湖表层水温及水文气象因子年尺度的相关性分析结果见图 10。可见,表层年均水温与年均地温、年均气温呈正相关关系;年均水温与年均风速呈负相关关系;风速与太阳辐射呈正相关关系;降水量与太阳辐射呈负相关关系,与相对湿度呈正相关关系。

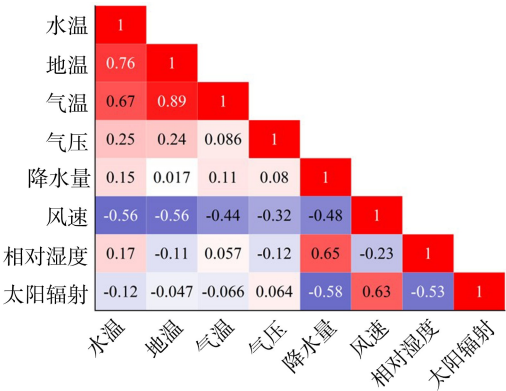


图 10 太湖表层水温及水文气象因子年尺度相关性
Fig.10 Correlation of surface water temperature and hydro-meteorological factors in Taihu Lake on annual scale

太湖表层水温及水文气象因子季节尺度的相关性见图 11。

a. 春季。太湖表层水温与气温呈强正相关关系,与气压呈中度正相关关系,与风速呈中度负相关关系;降水量与相对湿度呈正相关关系,与太阳辐射呈负相关关系;太阳辐射与相对湿度亦呈负相关关系。

b. 夏季。太湖表层水温与气温呈强正相关关系,与太阳辐射呈中度正相关关系,与相对湿度、降水量呈中度负相关关系。

c. 秋季。太湖表层水温与气温呈极强正相关关系,与太阳辐射、风速呈中度负相关关系。

d. 冬季。太湖表层水温与气温、相对湿度呈中度正相关关系,与风速呈中度负相关关系。

相关性分析表明,各水文气象因子之间存在相互作用。太湖表层水温与近地表气温正相关,但相关系数随时间尺度变化而有所不同,与降水量呈负相关关系;降水量与相对湿度在年尺度及春、夏、秋 3 季均正相关;风速与太阳辐射在年尺度及除春季外的其他季节均正相关,相反,与气压强度在所有研究尺度上均表现为负相关;气压在年尺度上受其他水文气象因子影响较弱,而在季节尺度上与其他变量多呈负相关关系。

3.3.2 驱动因素定量贡献分析

秋季近地表气温的升高以及平均风速的降低是

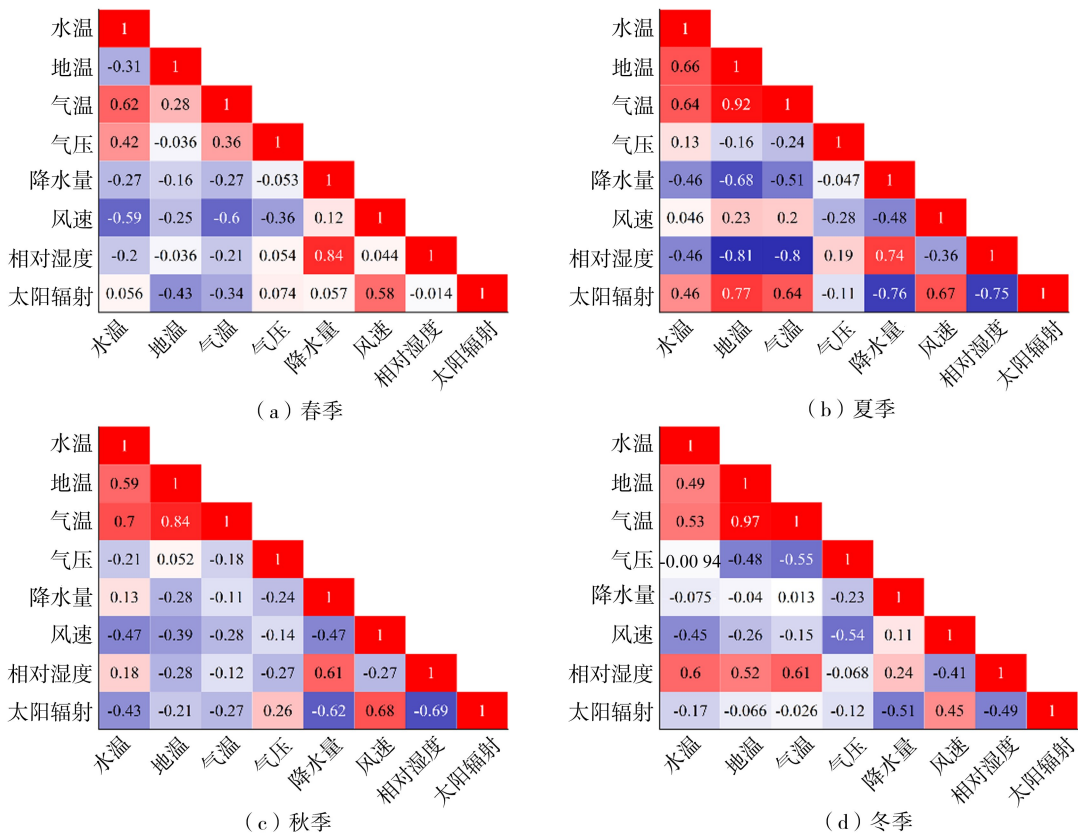


图 11 太湖表层水温及水文气象因子季节尺度相关性

Fig. 11 Correlation of surface water temperature and hydro-meteorological factors in Taihu Lake on seasonal scale

导致湖泊表层水温升温的主要原因,近地表气温的贡献率达到了 49%,风速的贡献率达到了 8%;冬季近地表气温、风速、相对湿度贡献率分别为 28%、11%、7%。

采用逐步多元回归法分析太湖表层水温变化的驱动因子贡献率。在模型构建过程中,发现地温与近地表气温之间存在较高的多重共线性,因此未将地温纳入回归模型。结果表明,在不同的时间尺度上,近地表气温、风速和相对湿度是驱动太湖表层水温变化的主要因素。

a. 年尺度上,太湖表层水温主要受近地表气温和风速的共同影响,贡献率分别为 44% 和 9%。具体而言,气候变暖导致近地表气温上升,进而加速了太湖表层水温的升高,其贡献率为 44%;年平均风速的下降也是促进太湖表层水温上升的重要因素,贡献率达 9%。

b. 季节尺度上,春季和夏季近地表气温是湖泊表层水温变化的主要驱动因子,贡献率分别为 38% 和 41%;秋季近地表气温的升高与平均风速的降低共同导致太湖表层水温上升,其中近地表气温贡献率为 49%,风速为 8%;冬季太湖表层水温主要受近地表气温、风速、相对湿度的影响,贡献率分别为 28%、11%和 7%。

3.4 讨论

3.4.1 太湖表层水温时空分布特征

在气候变暖的背景下,全球大部分湖库表层水温存在不同程度的上升情况,每 10 a 为 0.10 ~ 0.84℃^[31]。2002—2020 年,太湖表层水温整体呈上升趋势,平均增温速率每 10 a 达 0.50℃,高于全球大多数湖库平均水平,反映了太湖对气候变化响应的敏感性。太湖表层年均水温的高温区域主要分布在东太湖、贡湖。为满足上海市对太湖饮用水需求的持续增长,东太湖下游大浦闸出水量显著增加^[32],导致东太湖平均水位降低。而水位降低则通过减少水体热容量、扩大浅水区面积等方式,增强了湖体对热量变化响应的敏感性,造成东太湖春、夏、秋、冬表层多年平均最高水温均高于其他湖区。受近地表气温上升的影响^[33],自 2010 年太湖各湖区间平均温差增大,东太湖与湖心区的平均温差由 1.42℃ (2002—2010 年均值) 增至 1.61℃ (2010—2020 年均值)。

3.4.2 演变特征分析

2002 年实行的“引江济太”工程^[34],加快了贡湖部分水域的水流速度,增强了水体扰动,导致贡湖表层水温短期波动加剧。因此,2002—2020 年贡湖表层水温的变异系数为太湖 9 个湖区中最高,表现

出最强的不稳定性。2006—2007 年及 2009—2011 年曾发生厄尔尼诺/拉尼娜事件^[35],其通过影响季风环流进而影响我国的气候。厄尔尼诺年通常会伴随气温升高、降水减少;而拉尼娜年则表现为气温降低、降水增多。二者对气候因子的影响具有一定的滞后性,这是太湖流域气温、降雨突变年集中于 2003—2007 年及 2009—2013 年的重要原因之一。2006 年太湖流域气温偏高,而气温升高与太湖蓝藻生物量呈显著正相关关系,为 2007 年蓝藻暴发提供了关键环境条件^[36]。

3.4.3 驱动机制分析

Peng 等^[13]以中国五大湖泊为研究对象,发现近地表气温是最关键的驱动因子($\Delta R^2 = 36.2\%$),其对湖泊表层水温变化的贡献率明显高于其他驱动因子;而人类活动(GDP、不透水表面)对湖泊表层水温变化的贡献率呈上升趋势($\Delta R^2 = 10\%$)。湖泊表层水温受多种因素影响,自然因素主要包括近地表气温、降水量、风速、相对湿度和太阳辐射等^[37]。自 20 世纪 90 年代以来,太湖流域呈现气温上升、风速下降、降水量减少的趋势^[38]。

本文研究结果显示:①年尺度上,太湖表层水温主要受近地表气温($\Delta R^2 = 44\%$)、风速($\Delta R^2 = 9\%$)的共同影响。夏季太湖表层水温与气温的相关性(Pearson 相关系数为 0.64) 低于秋季(Pearson 相关系数为 0.70),原因在于夏季高温条件下大气持水能力增强,进而促进了水面的蒸发冷却过程^[39](近地表气温与相对湿度 Pearson 相关系数为-0.8);同时水温升高会增强表层水的逆辐射,从而削弱了表层水与近地表气温的相关性。风速通过影响湖泊表层蒸散发及水质输运过程,从而影响湖泊表层水温^[40]。风速降低会减弱湖泊与大气之间的湍流交换^[41],减缓湖泊热量散失,从而提高湖泊表层水温^[42]。②冬季相对湿度对太湖表层水温变化的贡献率达 11%。潘梅娥等^[43]指出,相对湿度的变化可通过调节潜热通量,进而影响湖泊水温。Yang 等^[15]指出,随着城市化进程的加快,不透水表面迅速扩张。由于不透水表面增长率的不同,降水量对湖泊表层水温的影响也不同。当不透水表面增长速率较慢时,降水量与水温呈负相关(Pearson 相关系数为-0.183)关系;当不透水表面增长速率较快时,降水量与水温呈正相关(Pearson 相关系数为 0.65)关系。

4 结 论

a. 空间分布上,太湖梅梁湾的表层年均水温呈极显著的上升趋势;西部、南部沿岸呈显著上升趋势;

势;湖心区呈微显著上升趋势;少部分微显著降温区域位于贡湖、东太湖。

b. 2002—2020 年太湖表层水温呈上升趋势,平均升温速率每 10 a 达 0.5℃;水文气象因子以降水持续升高,地温波动上升,气温、气压缓慢上升,风速、太阳辐射持续下降的趋势为主要特征。

c. 不同的时间尺度,近地表气温、风速、相对湿度的变化是驱动太湖表层水温变化的主要因子。对于年尺度,太湖表层水温主要受近地表气温($\Delta R^2 = 44\%$)、风速($\Delta R^2 = 9\%$)的共同影响。在季节尺度,春季和夏季时,近地表气温是太湖表层水温变化的主要驱动力(春季 $\Delta R^2 = 38\%$,夏季 $\Delta R^2 = 41\%$);秋季,近地表气温($\Delta R^2 = 49\%$)的升高以及平均风速($\Delta R^2 = 8\%$)的降低是导致太湖表层水温升温的主要原因;冬季太湖表层水温主要受近地表气温($\Delta R^2 = 28\%$)、相对湿度($\Delta R^2 = 11\%$)、风速($\Delta R^2 = 8\%$)的影响。

参考文献:

[1] WOOL R, KRAEMER B, LENTERS J, et al. Global lake responses to climate change[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1: 388-403.

[2] 吕兴菊,任婧,高登成,等. 湖泊水动力变化对沉水植物的影响研究综述[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 4245-4254. (LYU Xingju, REN Jing, GAO Dengcheng, et al. Impacts of hydrodynamic variation on submerged macrophytes in lakes: a review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 4245-4254. (in Chinese))

[3] YU Zhengyu, YANG Kun, LUO Yi, et al. Lake surface water temperature prediction and changing characteristics analysis: a case study of 11 natural lakes in Yunnan-Guizhou Plateau[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 122689.

[4] BACHMANN R W, CANFIELD D Er, SHARMA S, et al. Warming of near-surface summer water temperatures in lakes of the conterminous United States[J]. Water, 2020, 12(12): 3381.

[5] LI Cai, DING Shiming, CAI Yongju, et al. Decrease in macrofauna density increases the sediment phosphorus release and maintains the high phosphorus level of water column in Lake Taihu: a case study on *Grandidierella taihuensis*[J]. Water Research, 2022, 225: 119193.

[6] 朱喜,李贵宝,王圣瑞. 太湖蓝藻暴发的治理[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 106-111. (ZHU Xi, LI Guibao, WANG Shengrui. Treatment of blue algae outbreak in Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 106-111. (in Chinese))

[7] 叶羽婷,佟一帆,刘茂松. 太湖不同湖区水质状况及其随水温变化的比较[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(23):

- 93-98. (YE Yuting, TONG Yifan, LIU Maosong. Comparison of water quality in different areas in Taihu Lake and its change rule with water temperature [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(23): 93-98. (in Chinese))
- [8] SOJKA M, PTAK M, SZYGA-PLUTA K, et al. How useful are moderate resolution imaging spectroradiometer observations for inland water temperature monitoring and warming trend assessment in temperate lakes in Poland? [J]. Remote Sensing, 2024, 16(15): 2727.
- [9] AROMA R, RAIMOND K, ESTRELA V, et al. A coastal band spectral combination for water body extraction using Landsat 8 images [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2024, 21: 1767-1784.
- [10] DYBA K, ERMIDA S, PTAK M, et al. Evaluation of methods for estimating lake surface water temperature using Landsat 8 [J]. Remote Sensing, 2022, 14(15): 3839.
- [11] WANG Qunming, ZHANG Yihang, ONOJEGHUO O, et al. Enhancing spatio-temporal fusion of MODIS and Landsat data by incorporating 250 m MODIS data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(9): 4116-4123.
- [12] FARAJI Z, KAVIANI A, KHOSRAVI L. Downscaling the MODIS land surface temperature using a trapezoidal concept applied to the MODIS and sentinel 2 images [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2024, 196: 665.
- [13] PENG Zongqi, YANG Kun, SHANG Chunxue, et al. Attribution analysis of lake surface water temperature changing; taking China's six main lakes as example [J]. Ecological Indicators, 2022, 145: 109651.
- [14] ZHANG Guoqing, YAO Tandong, XIE Hongjie, et al. Estimating surface temperature changes of lakes in the Qinghai-Xizang Plateau using MODIS LST data [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2015, 119(14): 8552-8567.
- [15] YANG Kun, ZHANG Yan, LUO Yi, et al. Precipitation events impact on urban lake surface water temperature under the perspective of macroscopic scale [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(13): 16767-16780.
- [16] WOOLWAY R I, MERCHANT C J. Intralake heterogeneity of thermal responses to climate change: a study of large northern hemisphere lakes [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(6): 3087-3098.
- [17] SCHMID M, KOSTER O. Excess warming of a central European lake driven by solar brightening [J]. Water Resources Research, 2016, 52(10): 8103-8116.
- [18] DING Fei, ZHANG Wenjie, CHEN Liangyao, et al. Water quality assessment using optimized CWQII in Taihu Lake [J]. Environmental Research, 2022, 214(1): 113713.
- [19] 胡明涛, 陈诚, 李港, 等. 典型风力条件及水力调度下太湖藻华高频时空动态监测 [J]. 湖泊科学, 2024, 36(3): 685-694. (HU Mingtao, CHEN Cheng, LI Gang, et al. High-frequency spatial and temporal dynamics monitoring of algal blooms in Lake Taihu under typical wind conditions and hydraulic scheduling [J]. Journal of Lake Science, 2024, 36(3): 685-694. (in Chinese))
- [20] 刘聚涛, 高俊峰, 姜加虎, 等. 基于突变理论的太湖蓝藻水华危险性分区评价 [J]. 湖泊科学, 2010, 22(4): 488-494. (LIU Jutao, GAO Junfeng, JIANG Jiahu, et al. Catastrophe theory based risk evaluation of blue-green algae bloom of different regions in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Science, 2010, 22(4): 488-494. (in Chinese))
- [21] 康丽娟, 朱广伟, 邹伟, 等. 高温干旱背景下太湖藻情变化特征及机制 [J]. 湖泊科学, 2023, 35(6): 1866-1880. (KANG Lijuan, ZHU Guangwei, ZOU Wei, et al. Dynamics and mechanism of cyanobacterial blooms in Lake Taihu reacted extreme drought and warming [J]. Journal of Lake Science, 2023, 35(6): 1866-1880. (in Chinese))
- [22] AROMA R, RAIMOND K, ESTRELA V, et al. A coastal band spectral combination for water body extraction using Landsat 8 images [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2024, 21: 1767-1784.
- [23] 李云梅, 赵焕, 毕顺, 等. 基于水体光学分类的二类水体水环境参数遥感监测进展 [J]. 遥感学报, 2022, 26(1): 19-31. (LI Yunmei, ZHAO Huan, BI Shun, et al. Research progress of remote sensing monitoring of case II water environmental parameters based on water optical classification [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(1): 19-31. (in Chinese))
- [24] JEONG D, ST-HILAIRE A, GRATTON Y, et al. Simulation and regionalization of daily global solar radiation: a case study in Quebec, Canada [J]. Atmosphere-Ocean, 2016, 54(2): 117-130.
- [25] YAVUZ S. Improved visualization for trend analysis by comparing with classical Mann-Kendall test and ITA [J]. Journal of Hydrology, 2020, 584: 124674.
- [26] UDAY P, ASHOK K. Testing reliability of the spatial Hurst exponent method for detecting a change point [J]. Journal of Water & Climate Change, 2021, 12(8): 3661.
- [27] DAI Xiaoi, FAN Wenjie, SHAN Yunfeng, et al. LAI-based phenological changes and climate sensitivity analysis in the Three-River Headwaters Region [J]. Remote Sensing, 2022, 14(15): 3748.
- [28] RAFAŁ U, CZESŁAW K, BARTOSZ Ł, et al. Phytoplankton production in relation to simulated hydro- and thermodynamics during a hydrological wet year:

- Goczałkowice Reservoir (Poland) case study [J]. Ecological Indicators, 2021, 121: 106991.
- [29] 李嘉欣, 彭少明. 黄河流域用水现状及需水预测研究[J]. 人民黄河, 2024, 46(7): 66-71. (LI Jiaxin, PENG Shaoming. Study on the current situation of water use and water demand forecast in the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2024, 46(7): 66-71. (in Chinese))
- [30] LU Houliang, LI Fangfang, GONG Tongliang, et al. Reasons behind seasonal and monthly precipitation variability in the Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding areas from 1979 to 2017 [J]. Journal of Hydrology, 2023, 619: 129329.
- [31] O'REILLY C M, SHARMA S, GRAY D K, et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(24): 10773-10781.
- [32] 李琼芳, 许树洪, 陈启慧, 等. 环太湖各水资源分区入湖河流总磷浓度与负荷变化分析[J]. 湖泊科学, 2022, 34(1): 74-89. (LI Qiongfang, XU Shuhong, CHEN Qihui, et al. Analysis on the variation of total phosphorus concentrations and loads of inflow and outflow rivers from different water resources zones around Lake Taihu [J]. Journal of Lake Science, 2022, 34(1): 74-89. (in Chinese))
- [33] 何昶, 邓建明, 李雪纯, 等. 太湖流域近 60 年气温多时间尺度波动幅度的长期变化特征[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 130-138. (HE Chang, DENG Jianming, LI Xuechun, et al. Long-term characteristics of multi-time-scale fluctuation amplitude of temperature in the past six decades in Taihu Basin [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2022, 50(6): 130-138. (in Chinese))
- [34] 马明, 殷焱杰, 石亚东, 等. “引江济太”影响下太湖贡湖湾湖流时空变化[J]. 湖泊科学, 2024, 36(6): 1922-1932. (MA Ming, YIN Yijie, SHI Yadong, et al. Temporal and spatial changes of lake current in Gonghu Bay under the influence of water diversion from Yangtze River to Lake Taihu [J]. Journal of Lake Science, 2024, 36(6): 1922-1932. (in Chinese))
- [35] 张冲, 赵景波. 厄尔尼诺/拉尼娜事件对长江流域气候的影响研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 1-6. (ZHANG Chong, ZHAO Jingbo. Effects of El Niño: southern oscillation events on climate in Yangtze River Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(3): 1-6. (in Chinese))
- [36] 张运林, 秦伯强, 朱广伟. 过去 40 年太湖剧烈的湖泊物理环境变化及其潜在生态环境意义[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1348-1359. (ZHANG Yunlin, QIN Boqiang, ZHU Guangwei. Long-term changes in physical environments and potential implications for the environment of Lake Taihu in the past four decades [J]. Journal of Lake Science, 2020, 32(5): 1348-1359. (in Chinese))
- [37] 纪道斌, 成再强, 龙良红, 等. 三峡水库不同运行期库首水温分层特性及生态效应[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 34-42. (JI Daobin, CHENG Zaiqiang, LONG Lianghong, et al. Characteristics of thermal stratification in head area of Three Gorges Reservoir and ecological effects in different operation periods [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 34-42. (in Chinese))
- [38] 王锦旗, 宋玉芝, 薛艳. 气候变化诱导水体富营养化研究进展[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 145-155. (WANG Jinqi, SONG Yuzhi, XUE Yan. Research progress of water eutrophication induced by climate change [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 145-155. (in Chinese))
- [39] 白倩倩, 梁恩航, 王婷, 等. 洞庭湖表层水温变化特征及其对气候变化的响应[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2022, 58(2): 345-353. (BAI Qianqian, LIANG Enhang, WANG Ting, et al. Variation characteristics of surface water temperature and their response to climate change in Dongting Lake [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2022, 58(2): 345-353. (in Chinese))
- [40] 饶贵康, 王玲玲, 徐津, 等. 调水期风场对淮河入江水道浅水湖泊水动力水质的影响研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 31-37. (RAO Guikang, WANG Lingling, XU Jin, et al. Study on the effect of wind field on hydrodynamic water quality of shallow lakes in Huaihe River watercourse entering Yangtze River during the water diversion period [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 31-37. (in Chinese))
- [41] 付晓花, 董增川, 韩锐, 等. 复杂河网地区气候-水文-水动力耦合模型模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 162-169. (FU Xiaohua, DONG Zengchuan, HAN Rui, et al. Simulation of climate-hydrologic-hydrodynamic coupling model in complex river network area [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 162-169. (in Chinese))
- [42] CHICKADEL C C, BRANCH R, ASHER W E, et al. Laboratory heat flux estimates of seawater foam for low wind speeds [J]. Remote Sensing, 2022, 14: 1925.
- [43] 潘梅娥, 杨昆, 邹天乐, 等. 区域气候变化下洞里萨湖表层水温时空变化的归因[J]. 地理科学, 2022, 42(4): 739-750. (PAN Meie, YANG Kun, ZOU Tianle, et al. Determining factors in spatio-temporal variation of the Tonle Sap Lake's surface water temperature under regional climate change [J]. Scientia Geographica, 2022, 42(4): 739-750. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-02-14 编辑: 胡新宇)