

洞庭湖表层水温变化特征及其对气候变化的响应

白倩倩 梁恩航 王婷 王佳文[†]

教育部水沙科学重点实验室, 北京大学环境工程系, 北京 100871; [†]通信作者, E-mail: wjjww@pku.edu.cn

摘要 根据洞庭湖城陵矶站 1991—2019 年月平均水温和气温的同步资料, 基于线性趋势分析和小波分析方法, 系统地研究气温与水温的年内变化、年际变化趋势及周期性特征, 并探讨水温变化对气温、降水和风速变化的响应关系。结果表明, 多年平均水温与气温的年内变化规律相似, 1—8 月为升温期, 9—12 月为降温期; 近 29 年, 洞庭湖年平均水温和气温均呈现明显变暖的趋势, 分别以 0.35°C/10a 和 0.19°C/10a 的倾向率上升。小波分析结果表明, 不同季节的平均水温和气温均存在 14 年时间尺度的主周期变化。整体而言, 气温与水温的相关性最强, 气候变化可能是水温变化的主要驱动因素之一。

关键词 水温; 气温; 气候变化; 小波分析; 洞庭湖

Variation Characteristics of Surface Water Temperature and Their Response to Climate Change in Dongting Lake

BAI Qianqian, LIANG Enhang, WANG Ting, WANG Jiawen[†]

Key Laboratory of Water and Sediment Sciences (MOE), Department of Environmental Engineering, Peking University, Beijing 100871; [†] Corresponding author, E-mail: wjjww@pku.edu.cn

Abstract Based on the synchronized data of monthly average water temperature and air temperature at Chenglingji Station of Dongting Lake from 1991 to 2019, the intra-annual variations, the interannual variation trends, the periodicity characteristics of water temperature and air temperature were investigated by using the linear trend analysis and the wavelet analysis methods, and the response of water temperature changes to air temperature, precipitation, and wind speed changes was also discussed. The results showed a similar intra-annual variation pattern for the average water temperature and air temperature, which was the warming period ranged from January to August and the cooling period started from September to December. In the past 29 years, the annual average water temperature and air temperature exhibited an obvious warming trend, and increased at the rate of 0.35°C/10a and 0.19°C/10a, respectively. Meanwhile, the wavelet analysis revealed that average water temperature and air temperature in different seasons performed an oscillation period of 14 years. Overall, the strongest correlation between air temperature and water temperature indicated that climate change could be one of the main factors driving the variations of water temperature.

Key words water temperature; air temperature; climate change; wavelet analysis; Dongting Lake

湖泊是水生生态系统的重要组成部分, 是自然界物质循环和能量流动的重要途径。湖泊对气候变化极为敏感, 是区域气候的理想整合器, 常被用来指示当地的局部气候特征^[1-2]。湖泊水温是湖泊理化过程和动力现象的主要因素, 是水生生物生存的重要环境条件, 也是湖泊生态系统初级生产力的重

要决定因素, 不仅影响水生生物的新陈代谢及生长繁殖过程, 还决定生物种群的组成结构和空间分布格局^[3-6]。湖泊水温是湖泊热量平衡的结果, 不仅受到水面蒸发、地表径流及支流入汇等水循环过程的影响, 还受到气温、降水及大气辐射等气象因素及人类活动的综合影响。湖泊水温是湖泊生态系统

稳定的重要物理参数之一,对全球气候变化和人类活动具有重要的指示作用^[7]。

大量研究表明,湖泊水温会随着全球气候变暖发生明显的变化^[8-12]。Huang等^[13]分析西藏纳木措 1979—2012 年的水温变化特征,发现纳木措水温对气候变暖具有明显的响应。Wei等^[14]分析青藏高原 374 个湖泊的夜间表面水温,结果表明湖泊的增温率(0.037°C/a)与气温的增温率几乎一致。Yang等^[15]研究云贵高原 11 个湖泊表面水温的时空变化过程,结果表明气温上升是导致云贵高原湖泊水温上升的主要原因之一。吴攀等^[16]探讨云南滇池夏季水温的变化特征,发现近地表气温与滇池表面水温正相关。李其江^[17]研究青海湖表层水温变化特征及对气候变化的响应,结果表明气温是表层水温变化的主要影响因子之一。然而,目前关于非高原地带湖泊水温的变化规律及对气温变化响应的了解十分有限。

作为中国典型淡水湖之一,洞庭湖位于长江中下游平原地区,具有重要的防洪、饮水及其他生态作用^[18-19]。研究洞庭湖水温对全球气候变化的响应,对湖泊水资源规划、水环境保护和生态系统健康管理具有重要的科学价值。然而,目前关于洞庭湖水温特征的了解甚少。刘鹏翼等^[20]通过分析 1960—2010 年洞庭湖水温变化的趋势,发现水温呈波动性上升,但他们未对造成水温上升趋势的原因进行深入的分析。鉴于上述背景,本文对洞庭湖水温和气温的年内变化、年际变化趋势及周期性特征进行深入的研究,并探讨水温对气温、降水和风速变化的响应。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

洞庭湖位于湖南省北部,长江荆江河段南岸,是我国第二大淡水湖泊,同时也是长江流域重要的调蓄湖泊^[21-22]。洞庭湖位于东经 110°40′—113°10′,北纬 28°30′—30°20′,流域面积为 26.28 万 km²,占长江流域总面积的 14.6%。洞庭湖区水系复杂,河网密布,既有湘、资、沅、澧四水和区间来水入汇,又通过荆江松滋、太平、藕池三口接纳长江分泄的水沙。荆江三口、四水和区间入汇的水沙通过洞庭湖调蓄后,由城陵矶注入长江^[23-24]。城陵矶水文站设立于 1904 年,是洞庭湖出口水文控制站,位于东经 113°08′,北纬 29°25′。城陵矶水文站上游约 4 km

为东洞庭湖,下游约 4 km 为长江荆江与洞庭湖出流汇合口^[20]。

1.2 数据资料

本文选取洞庭湖城陵矶水文站 1991—2019 年共 29 年逐月平均水温及同期洞庭湖月平均气温资料,气温数据来源于中国气象科学数据科学中心(<http://data.cma.cn/>),水温数据来源于长江水利委员会。降水和风速数据来自 GSOD(Global Surface Summary of the Day)(<https://www.ncei.noaa.gov>)。

1.3 统计分析方法

为反映洞庭湖水温和气温变化的总趋势,分别对春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12—次年 2 月)以及年平均、年最高、年最低温度序列进行线性拟合,以拟合直线斜率的 10 倍为温度倾向率,代表每 10 年温度的变化值。利用 Matlab 实现连续小波变换,分析温度变化的周期性特征。使用 SPSS 进行 Pearson 相关性分析,进一步探讨气温与水温的关系。本文选取 0.05 的显著性水平。

小波分析的基本原理是通过增加或减小伸缩尺度,得到信号的低频或高频信息,然后分析信号的概貌或细节,实现对信号不同时间尺度和空间局部特征的分析^[25]。常用的小波函数有 Mexican Hat 小波、Dmey 小波和复 Morlet 小波等。作为复数形式的小波,复 Morlet 小波的实部与虚部位相相差 $\pi/2$,消除了实部形式小波在变换过程中系数模的振荡。因此,本研究选用复 Morlet 小波函数,对时间序列进行连续小波变换^[26]。

对于某个给定的小波函数 $\psi(t)$,可通过尺度的伸缩和时间轴上的平移构成一簇函数系:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in R \text{ 且 } a \neq 0, \quad (1)$$

$\psi_{a,b}(t)$ 为子小波, a 为尺度因子, b 为时间因子。

通过连续小波变换,得出小波系数 $W_f(a, b)$ 与水文时间序列 $f(t)$ 的关系为

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt, \quad (2)$$

$\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$ 为 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的复共轭函数。将小波系数的平方值在 b 域上积分,得到小波方差,即

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db. \quad (3)$$

小波方差随尺度 a 的变化过程,称为小波方差图。它能反映信号波动的能量随尺度 a 的分布,可以用来确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度,对应峰值处的尺度称为该序列的主周期^[27]。

2 结果与讨论

2.1 趋势分析

2.1.1 水温与气温的年内变化

图1显示洞庭湖城陵矶水文站1991—2019年多年平均水温与同期多年平均气温的年内变化特征。城陵矶水文站的多年月平均水温在7.6~29.5°C之间,1—8月为增温期,9—12月为降温期,最高月平均水温出现在8月(29.5±1.04°C),最低月平均水温出现在1月(7.6±1.9°C)。同时,城陵矶水文站的多年月平均气温在6.1~32.5°C之间,其年内变化规律与水温相同,最高气温也出现在8月。对比各月的水温与气温变化,发现仅12月和1月的气温低于水温,只有1月的气温在个别年份低于0°C。1—12月气温的标准差均大于水温的标准差,表明1991—2019年期间,各月水温的变化比气温变化小,即水温比较稳定,而气温波动较大。此外,湖泊的年内变化规律与部分河流类似,如黄河上游高寒区河流最高水温出现在7月或8月^[28],长江上游各水文站最高水温也出现在6—8月^[29],年内变化均分为升温期和降温期。值得注意的是,不同水生生态系统最高水温出现的时间并不总是一致,可能由于不同水生生态系统所处的地理位置不同,区间降雨径流和支流汇入特征具有明显差异,同时,水力停留时间和辐射强度的差异致使地温具有较大的差异,从而影响湖泊的热交换过程^[28]。

2.1.2 年平均、年最高、年最低水温与气温变化趋势

图2显示城陵矶站年平均、年最高、年最低水温与气温的过程线和变化趋势。1991—2019年城陵矶站的年平均水温呈波动性上升,年平均水温最低值出现在1996年,为17.0°C;年平均水温最高值出现在2004年,为20.0°C;多年平均水温为18.9°C。从线性趋势分析结果发现,城陵矶站29年来年平均水温以0.35°C/10a的倾向率上升,而年平均气温以0.19°C/10a的倾向率上升;年最高水温与气温也呈现波动性上升,倾向率分别为0.53°C/10a和0.50°C/10a,表明年最高水温与气温变化幅度相近;年最低水温与气温分别以0.02°C/10a和0.31°C/10a的倾向率下降。年平均及年最高水温与气温的变化趋势基本上一致,说明水温升高与气温的持续上升密切相关。刘鹏翼等^[20]报道的1960—2010年城陵矶站的年平均水温上升倾向率(0.18°C/10a)小于本研究中水温上升倾向率(0.35°C/10a),可能是由于城陵矶站的年平均水温在20世纪60—70年代呈下降趋势,在80年代后逐渐上升。Wei等^[14]对青藏高原374个湖泊2001—2015年的水温进行分析,发现平均倾向率约为0.37°C/10a,与洞庭湖的变化率基本上相同。上述结果表明,尽管洞庭湖是典型的非高原湖泊,但湖泊水温变化对气候变化的响应同样敏感。

2.1.3 各季节水温与气温变化趋势

为进一步探究水温与气温的关系,我们分别对1991—2019年4个季节的水温与气温变化过程及趋势进行分析,结果见图3。对比水温与气温的变化趋势,发现春季、夏季和秋季的平均水温与平均气温均呈上升趋势,变化倾向率基本上相同,且气温略高于水温。然而,冬季气温略低于水温,气温以

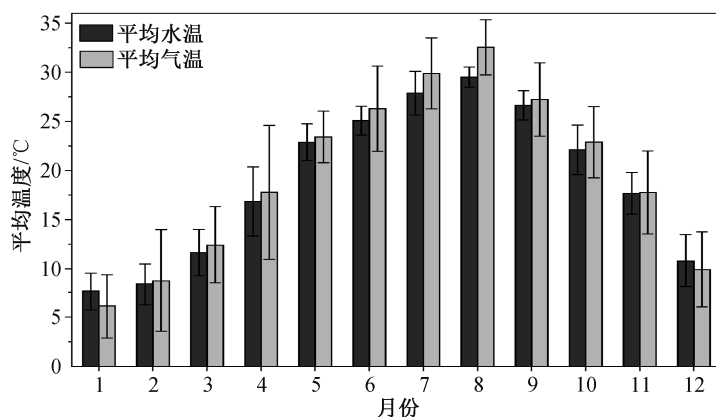


图1 城陵矶水文站1991—2019年平均水温与平均气温的年内变化

Fig. 1 Intra-annual variation of water temperature and air temperature in Chenglingji hydrological station from 1991 to 2019

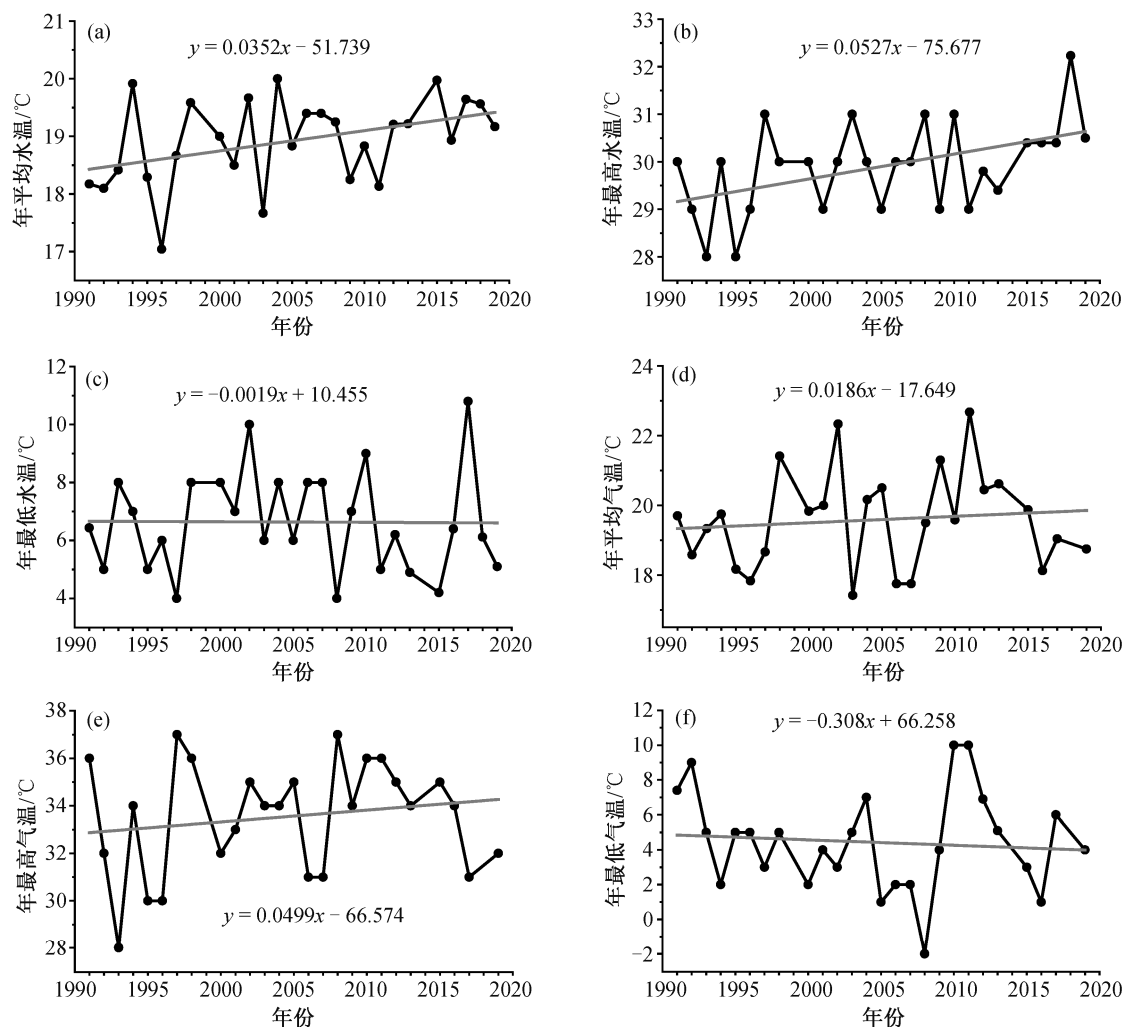


图 2 城陵矶水文站年平均(a)、年最高(b)和年最低(c)水温的变化趋势以及年平均(d)、年最高(e)、年最低(f)气温的变化趋势
 Fig. 2 Trends of annual average (a), annual maximum (b), and annual minimum (c) water temperature, as well as annual average (d), annual maximum (e), and annual minimum (f) air temperature in Chenglingji hydrological station

0.18°C/10a 的倾向率下降, 但水温以 0.13°C/10a 的倾向率上升。拉尼娜事件和北极海冰面积异常偏小等外强迫因子导致长江流域冬季气温持续偏低, 使得与长江相连的洞庭湖冬季水温有所下降^[30]。冬季水温却呈现上升趋势, 可能是由于除了湖水与大气的热交换过程外, 降雨径流、支流入汇及地温等其他因素也会显著地影响冬季的水温变化^[17]。

2.2 变化周期

图 4 显示洞庭湖 1991—2019 年水温与同期平均气温序列的小波系数实部等值线和小波系数方差曲线。在小波系数等值线图中, 小波系数实部为正表示水温和气温偏高时期, 小波系数实部为负表示水温和气温偏低时期, 为零则表示对应的突变点。

如图 4(a1)~(a4)所示, 对 1991—2019 年洞庭湖

水温变化周期进行分析, 发现春季和夏季平均水温的小波系数方差曲线的最大峰值均对应 14 年的时间尺度, 表明春季和夏季水温变化具有明显的震荡周期, 且第一主周期均为 14 年。此外, 春季水温的第二主周期为 7 年, 夏季水温未观察到其他变化周期。秋季和冬季平均水温的第一主周期分别为 11 年和 8 年, 第二主周期对应 14 年的时间尺度。

如图 4(b1)~(b2)所示, 对 1991—2019 年洞庭湖气温变化周期进行分析, 发现春、夏、秋和冬季气温小波系数方差曲线最大峰值对应 14 年的时间尺度, 说明气温变化的第一主周期为 14 年。此外, 春季气温时间序列变化的第二和第三主周期分别为 7 年和 3 年, 夏季和冬季气温变化的第二主周期均为 5 年, 秋季气温变化的第二和三主周期依次为 11 年

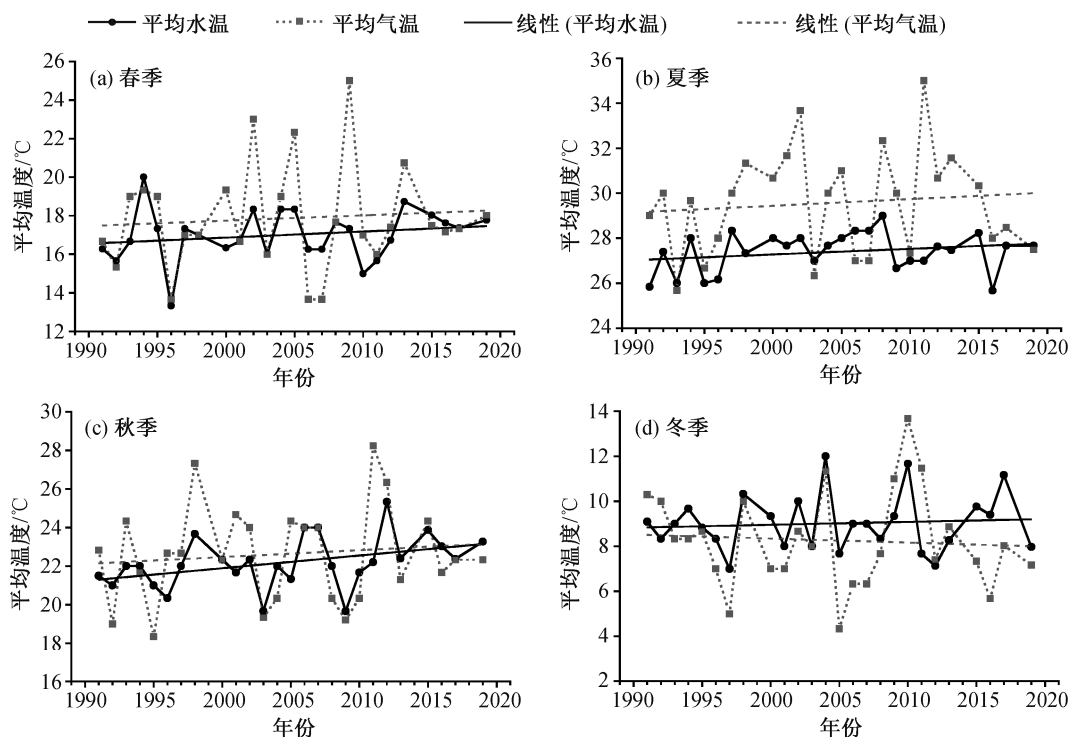


图3 城陵矶水文站春季(a)、夏季(b)、秋季(c)和冬季(d)水温与气温的变化趋势

Fig. 3 Trends of water temperature and air temperature in spring (a), summer (b), autumn (c), and winter (d) for Chenglingji hydrological station

和4年。

对比气温和水温的变化,洞庭湖1991—2019年不同季节的平均水温与气温的周期性变化规律类似,均表现出明显的14年特征时间尺度的周期变化,进一步表明洞庭湖各季节的表层水温变化与气温变化十分密切。

2.3 表层水温与气象因子的关系

本文选用气温、降水和风速3种气象要素,探究洞庭湖表层水温与气象因素的响应关系,结果见图5。从相关性分析结果看,城陵矶站表层水温与降水和风速的Pearson相关系数 r 分别为0.2298和0.1930,表明水温与降水和风速这两个气象因子的相关性很弱。然而,城陵矶站表层水温与同期平均气温表现出极强的相关性,Pearson相关系数 r 高达0.9332,且通过0.05的显著性检验。因此,我们认为气温可能是洞庭湖表面水温变化的主导因子,气候变化可能是水温变化的重要驱动因素。

气温因素通常是湖泊水温最直接的影响因子,也是关键的主导因子^[31]。气温变化会影响大气长波辐射的强度、水气感热交换的方向和强度以及水面的蒸发冷却等,从而影响水温的变化。1991—

2019年洞庭湖年平均及各季节平均水温和平均气温趋势分析结果(图2和3),近29年来,洞庭湖水温和气温均呈上升趋势,且两者变化的倾向率也相近,可能由于随着全球气候变暖,气温显著上升,导致洞庭湖水温和气温也表现出明显的上升趋势。

水温与气温可能存在明显的年内周期震荡规律,导致月平均水温与气温的相关系数整体上较高(图5(c))。本研究进一步探究各月平均水温与平均气温的线性相关关系(图6),发现除1月和8月外,其余各月的平均水温与平均气温之间均表现出显著的线性相关关系。平均水温与平均气温的相关系数 r 在春季3月、4月和5月分别为0.6762, 0.7899和0.6191,夏季6月、7月和8月分别为0.6198, 0.6481和0.264,秋季9月、10月和11月分别为0.4958, 0.6364和0.7183,冬季12月、1月和2月分别为0.7624, 0.2616和0.7424。其中,1月水温与气温的相关性很弱,可能是由于1月平均水温大于平均气温,水气感热交换的方向发生变化,并且,除气温之外,降雨径流、支流入汇、地温、近地面空气比湿及地表气压等其他因素也会影响水温^[17]。同时,当1月气温低于零下时,冰的形成会释放潜热,阻

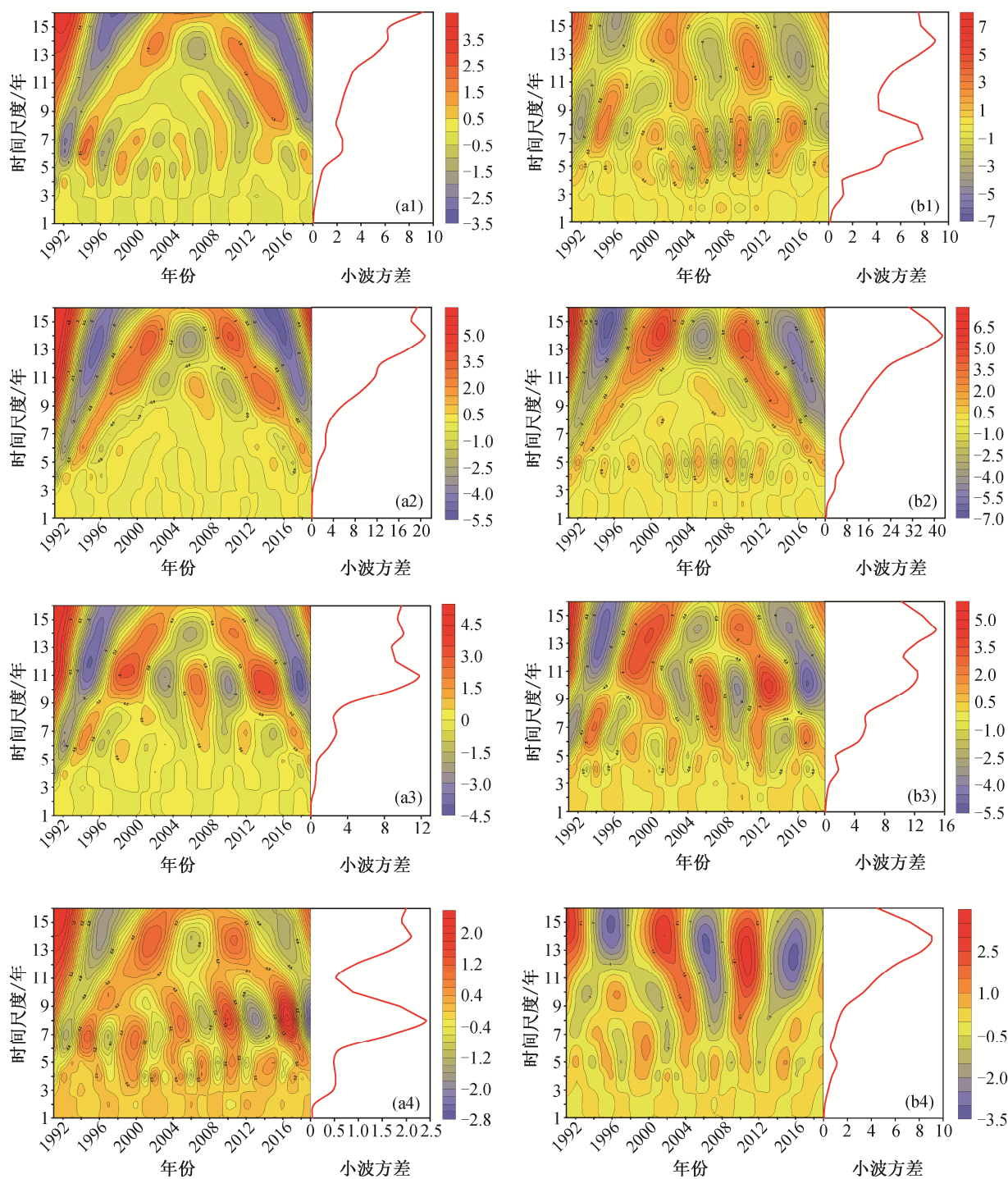


图 4 城陵矶水文站春季(a1)、夏季(a2)、秋季(a3)和冬季(a4)水温与春季(b1)、夏季(b2)、秋季(b3)及冬季(b4)气温小波系数实部的等值线及方差曲线

Fig. 4 Wavelet coefficient real part contour map and variance curve diagram for the water temperature in spring (a1), summer (a2), autumn (a3), and winter (a4) as well as the air temperature in spring (b1), summer (b2), autumn (b3), and winter (b4) for Chenglingji hydrological station

止水温在 0°C 以下大幅度下降, 导致水温与气温之间较弱的相关性^[32]。例如, 熊明等^[33]发现, 当长江源区沱沱河站 10 月气温完全低于 0°C 时, 水温与气

温之间基本上不存在线性关系。8 月水温与气温的相关性较差, 可能是由于 1991—2019 年 8 月气温多在 30°C 以上, 大气持水能力的增加会促进水面的蒸

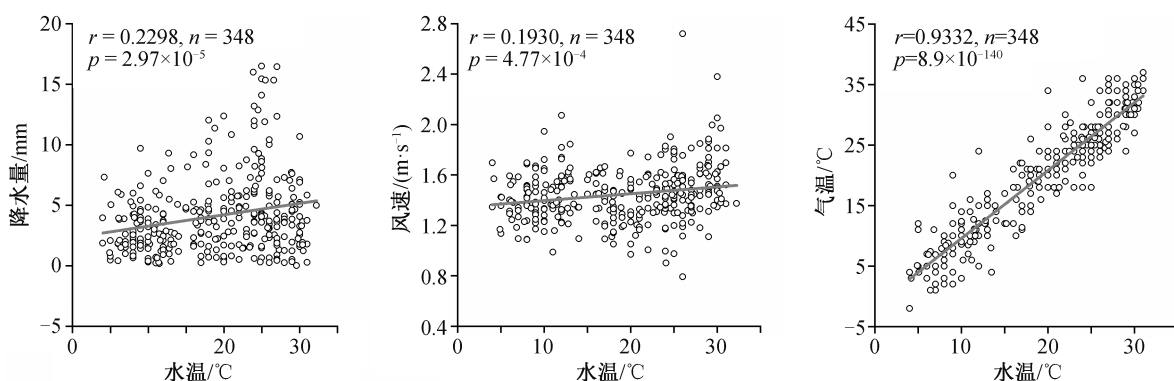


图 5 城陵矶水文站表层水温与降水(a)、风速(b)和气温(c)的相关关系

Fig. 5 Correlation between surface water temperature and precipitation (a), wind speed (b), and air temperature (c) for Chenglingji hydrological station

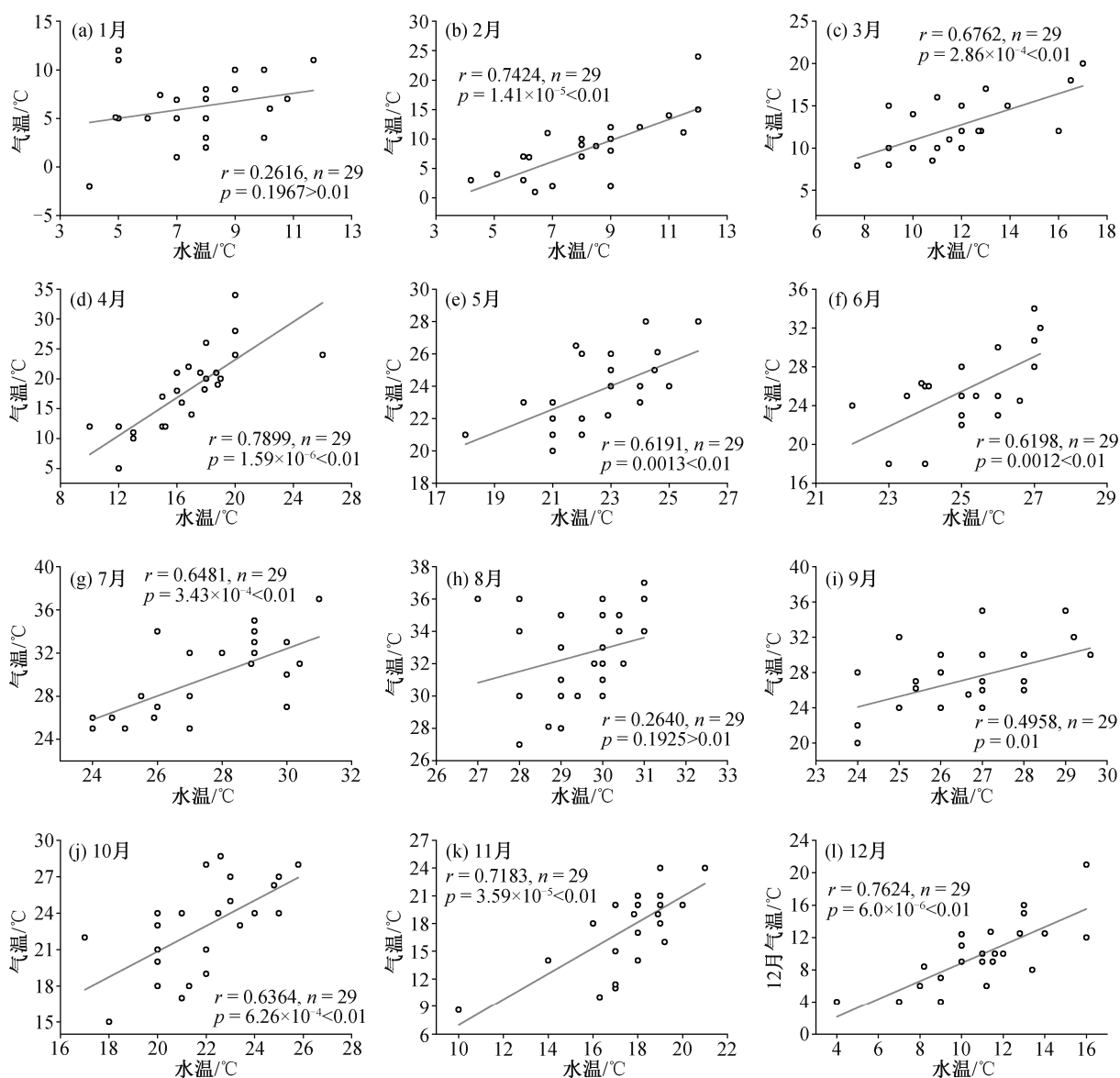


图 6 城陵矶水文站各月平均水温与平均气温的线性相关关系

Fig. 6 Linear correlation between monthly water temperature and monthly air temperature for Chenglingji hydrological station

发冷却, 并且, 当水温升高时, 水表面的逆辐射也会增强, 从而减弱水温与气温间的线性关系^[34-35]。因此, 当冬季或春季的气温很低或很高时, 水温对气温变化的响应可能受其他因素的影响较大, 从而减弱水温与气温间的线性相关性。

整体而言, 本研究发现气温与水温的变化规律类似, 二者之间呈现显著的相关性, 表明气温可能是水温变化的主要影响因素之一。因此, 在气候变暖背景下探究湖泊表面水温的变化特征, 对保护湖泊生态环境和维持湖泊生态系统健康具有重要的意义。

3 结论

本文通过对洞庭湖城陵矶站 1991—2019 年的水温和气温序列数据进行趋势分析、周期性分析以及相关分析, 得到如下结论。

1) 多年平均水温与气温有相似的年内变化规律。1—8 月为增温期, 9—12 月为降温期, 最高温度出现在 8 月, 最低温度出现在 1 月; 水温的波动比气温小。

2) 洞庭湖城陵矶站水温呈上升趋势, 与气温的变化趋势基本上一致。年平均水温和气温分别以 0.35°C/10a 和 0.19°C/10a 的变化率上升。

3) 洞庭湖城陵矶站 1991—2019 年平均水温和气温的周期变化类似, 在不同季节均表现出 14 年时间尺度的周期变化。

4) 洞庭湖城陵矶站表层水温与同期平均气温之间的相关性最强, 气温变化可能是洞庭湖水温变化的主要影响因素之一。

参考文献

[1] George D G. Lakes as integrators and amplifiers of the local climate. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 2006, 29(4): 1966–1970

[2] Blenckner T. A conceptual model of climate-related effects on lake ecosystems. *Hydrobiologia*, 2005, 533(1): 1–14

[3] Ebersole J L, Liss W J, Frissell C A. Relationship between stream temperature, thermal refugia and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* abundance in arid-land streams in the northwestern United States. *Ecology of Freshwater Fish*, 2001, 10: 1–10

[4] Coutant C C. Perspectives on temperature in the

Pacific Northwest's fresh waters [R/OL]. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Lab, 1999 [2021–04–04]. <https://doi.org/10.2172/9042>

[5] Caissie D. The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*, 2006, 51: 1389–1406

[6] Webb B, Walling D. Long-term variability in the thermal impact of river impoundment and regulation. *Applied Geography*, 1996, 16(3): 211–223

[7] Adrian R, Reilly C, Zagarese H, et al. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(6): 2283–2297

[8] Snyder C W. Evolution of global temperature over the past two million years. *Nature*, 2016, 538: 226–228

[9] Gooseff M N, Strzepek K, Chapra S C. Modeling the potential effects of climate change on water temperature downstream of a shallow reservoir, lower Madison river, MT. *Climatic Change*, 2005, 68(3): 331–353

[10] Schmid M, Hunziker S, Wüest A. Lake surface temperatures in a changing climate: a global sensitivity analysis. *Climatic Change*, 2014, 124(1): 301–315

[11] 王书霞, 张利平, 李意, 等. 气候变化情景下澜沧江流域极端洪水事件研究. *气候变化研究进展*, 2019, 15(1): 23–32

[12] 苗正伟, 李娜, 路梅, 等. 1961—2017 年京津冀地区极端降水事件变化特征. *水利水电技术*, 2019, 50(3): 34–44

[13] Huang L, Wang J, Zhu L, et al. The warming of large lakes on the Tibetan Plateau: evidence from a lake model simulation of Nam Co, China, during 1979–2012. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2017, 122(24): 13095–13107

[14] Wei W, Li H, Xie H, et al. A comprehensive data set of lake surface water temperature over the Tibetan Plateau derived from MODIS LST products 2001–2015. *Scientific Data*, 2017, 4(1): 1–10

[15] Yang K, Yu Z, Luo Y. Spatial-temporal variation of lake surface water temperature and its driving factors in Yunnan-Guizhou Plateau. *Water Resources Research*, 2019, 55(6): 4688–4703

[16] 吴攀, 邓建明, 秦伯强, 等. 水温和营养盐增加对太湖冬、春季节藻类生长的影响. *环境科学研究*, 2013, 26(10): 1064–1071

[17] 李其江. 青海湖表层水温变化特征及对气候变化的响应. *人民黄河*, 2018, 40(11): 29–33

[18] 余果. 近 60 年洞庭湖水沙演变特征及其影响因素

- [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2012
- [19] 李晖, 尹辉, 白旻, 等. 近 60 年洞庭湖区水沙演变特征及趋势预测. 水土保持研究, 2013, 20(3): 139–142
- [20] 刘鹏翼, 汪亚能, 曹赤林. 洞庭湖湖口城陵矶站历年水温变化趋势分析. 湖南水利水电, 2011(6): 49–50
- [21] 周牡丹. 洞庭湖区降水与径流特征分析. 水资源开发与管理, 2021(2): 59–63
- [22] 陈莫非, 李安强, 马强. 2020 年洪水洞庭湖调蓄作用分析. 水利水电快报, 2021, 42(1): 33–38
- [23] 张振全, 黎昔春, 郑颖. 洞庭湖对洪水的调蓄作用及变化规律研究. 泥沙研究, 2014(2): 68–74
- [24] 王文松. 洞庭湖水沙关系及其对干旱灾害的影响分析[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2013
- [25] 刘昭伟, 吕平毓, 于阳, 等. 50 年来金沙江干流水温变化特征分析. 淡水渔业, 2014, 44(6): 49–54
- [26] 郭文献, 夏自强, 王鸿翔, 等. 近 50 年来长江宜昌站水温变化的多尺度分析. 水利学报, 2008(11): 1197–1203
- [27] 熊明, 李珏, 陈雅莉. 金沙江上游径流演变趋势及自然驱动力. 水资源研究, 2020, 9(3): 235–248
- [28] 袁博, 周孝德, 宋策, 等. 黄河上游高寒区河流水温变化特征及影响因素研究. 干旱区资源与环境, 2013, 27(12): 59–65
- [29] 邹珊, 李雨, 陈金凤, 等. 长江攀枝花-宜昌江段水温时空变化规律. 长江科学院院报, 2020, 37(8): 35–41
- [30] 郭广芬, 周月华, 高正旭, 等. 2011 年冬季长江流域气温持续偏低的可能成因探析. 暴雨灾害, 2013, 32(2): 176–181
- [31] 张月月. 气候变暖背景下滇池表面水温响应过程研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2020
- [32] Webb B W, Nobilis F. Long-term perspective on the nature of the air-water temperature relationship: a case study. Hydrological Processes, 1997, 11(2): 137–147
- [33] 熊明, 邹珊, 姜彤, 等. 长江源区河流水温对气候变化的响应. 人民长江, 2018, 49(14): 48–64
- [34] Mohseni O, Erickson T R, Stefan H G. Sensitivity of stream temperatures in the United States to air temperatures projected under a global warming scenario. Water Resources Research, 1999, 35(12): 3723–3733
- [35] Mohseni O, Erickson T R, Stefan H G. Upper bounds for stream temperatures in the contiguous United States. Journal of Environmental Engineering, 2002, 128(1): 4–11