Journal of Southwest University (Natural Science Edition)

DOI: 10.13718/j. cnki. xdzk. 2024.08.013

杨雨蒙,吴新豪,张莉. 1979-2022 年赤水河流域极端温度降水特征分析 [J].西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(8): 138-149.

1979-2022 年赤水河流域极端温度 降水特征分析

杨雨蒙¹, 吴新豪², 张莉³, 赵亮⁴, 赵劲松², 张正强², 穆彪⁵

1. 贵州省气象灾害防御技术中心,贵阳 550081; 2. 贵州省仁怀市气象局,贵州 仁怀 564501;

3. 遵义市生态环境局仁怀分局,贵州 仁怀 564501;4. 中国科学院 大气物理研究所,北京 100029;

5. 贵州大学, 生命科学学院, 贵阳 550025

摘要:基于气温日均值资料,评估了欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析数据集(ERA5)资料在赤水河流域周 边地区的可信度.通过 ERA5 计算 1979—2022 年间赤水河流域及周边地区的极端温度和降水特征.结果表明:春 季热源在 2000 年后发生位相转换,呈青藏高原暖周边冷分布,异常信号进一步影响位于下游的赤水河流域,导致 该地温度上升,降水减少.赤水河流域 2005 年前后温度、降水模态发生位相转换,由于温度经向梯度异常,阻碍夏 季西南风发生发展,导致该地水汽条件不充分,转为干热气候.其中,2006 年、2013 年、2022 年为异常暖干年份. 在该气候背景下高温指数与降水显著相关,满足高温总伴随少雨天气现象,且干热复合事件出现次数逐年增多.

关键 词: 气候变暖; 极端温度; 赤水河流域

中图分类号: P466 文献标志码: A 文章编号: 1673 - 9868(2024)08 - 0138 - 12

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 🔳



Analysis of Extreme Summer Temperature and Precipitation Characteristics in the Chishui River Basin from 1979 to 2022

YANG Yumeng¹, WU Xinhao², ZHANG Li³, ZHAO Liang⁴, ZHAO Jinsong², ZHANG Zhengqiang², MU Biao⁵

收稿日期: 2023-06-19

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA23090102);国家自然科学基金项目(31860610);贵州省仁怀市政府项目 (GZBL-CG22-A(2022-152号)).

作者简介:杨雨蒙,硕士,助理工程师,主要从事气候变化研究.

通信作者:穆彪,博士,教授.

- 1. Guizhou Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Guiyang 550081, China;
- 2. Renhuai Meteorological Bureau of Guizhou Province, Renhuai Guizhou 564501, China;
- 3. Renhuai Branch of Zunyi Ecological Environment Bureau, Renhuai Guizhou 564500, China;
- 4. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
- 5. College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract: There is a lack of systematic research on climate change in temperature and precipitation in the Chishui River basin. We found that ERA5 dataset has a high degree of confidence in the surrounding areas of the basin through the comparative assessment. Based on ERA5, we analysed the extreme temperature and precipitation characteristics in the basin during the period 1979 - 2022. The results show that the spring apparent heat source underwent a phase shift after 2000, showing a cold distribution around the warm Tibetan Plateau, and the anomalous signal further affected the Chishui River basin, which is located downstream, leading to an increase in temperature and a decrease in precipitation. The basin underwent a phase shift in temperature and precipitation patterns around 2005. Due to the anomalous temperature meridional gradient, which prevented the development of southwester in summer. The water vapour conditions in the area were inadequate, which turned climate to dry and hot. Attention should be payed that 2006, 2013 and 2022 were the anomalously warm and dry years. The high temperature index was significantly correlated with precipitation in this climatic context, and high temperatures were always accompanied by low rainfall, with the number of compound dry-hot events increasing each year.

Key words: climate warming; extreme temperature; Chishui River basin

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告^[1]指出,过去 10 年全球平均气温比 1850-1900 年高出约 1.1 ℃.大部分地区极端高温热浪事件发生频率和持续时间不断增加,强度频频创下新 高^[2-3].未来一些地区的干旱将更加严重,如东亚、北美西部、西欧和中欧^[4-7].

北半球夏季极端高温热浪等极端事件发生频繁,中国是受气候变化影响较强的敏感脆弱地区.在过去 几十年里,中国极端高温事件发生频率呈增加趋势^[8-9].进一步的研究指出,极端高温事件变化趋势表现出 发生区域、事件强度、持续时间各不相同的差异性^[10-12].在发生区域上,干热型高温一般出现在我国华北、 东北和西北地区,湿热型高温一般出现在我国沿海、长江中下游以及华南等地区^[13-14].在发生频率及持续 时间上,华中、华东和西北地区的平均高温热浪次数及总天数要多于中国其他地区,而北方的热浪天气持 续时间短,强度更大^[15-16].西南地区以 0.012 ℃/年的增温速率变化,高于全球平均温度上升速率,而该地 区降水量在近 50 年来呈下降趋势^[17-18].贵州省近 50 年来极端暖指数总体呈上升趋势,并且高海拔地区上 升趋势更为明显,极端冷指数在 2000 年后显著降低,整体变暖趋势较为显著^[19].

流经云南、贵州、四川共 400 多公里长、海拔 300~600 m 的赤水河谷地段,是中国顶级酱酒酿造的黄 金地段.但是,在全球气候变暖的背景下,持续高温热浪天气往往伴随着少雨干旱,与土壤湿度、植被指数 呈明显的负相关性,影响植物生长发育,使农林牧业的产量和品质下降^[20-21].当温度高于 25 ℃时,高粱籽 粒大小和产量降低^[22].目前,关于赤水河流域周边地区气温变化呈哪种模态变化的研究较少,无法准确地 为白酒产业提供气象服务.因此,对酱酒产区气候进行调查,厘清当地温度变化趋势,对揭示茅台酒产区 气候的独特性具有一定的意义.

1 资料及方法

1.1 资料

1) ERA5 再分析资料.水平分辨率为 1°×1°的 1 000~100 hPa 逐月再分析资料包括:温度场、垂直速度、经向/纬向风、2 m 温度、位势高度;水平分辨率为 0.1°×0.1°的地面逐月资料包括:2 m 温度场、降水;0.1°×0.1°的地面逐日资料包括:日最高、最低温、日均温.时间范围:1979-2022 年^[23].

2)根据中国气象局国家气象信息中心提供的国家地面站日值数据,从中选取合江、赤水、习水、古 菌、仁怀、金沙、毕节、威信、镇雄9个站点1979-2020年的逐日均温、日最高、最低温及夏季逐日降 水进行分析.

1.2 极端气候指数定义

本文使用 ETCCDI(Expert Team on Climate Change Detection and Indices)定义的 4 个极端温度指数 来定义高温热浪事件^[24],这些指数用于评估全球气候变化的诸多方面,包括温度事件的强度、频率和持续 时间变化,比单独温度极值更具可信度.本文使用了 4 个高温热浪指标,并根据夏日日数(SU)指数,定义 了夏日少雨日数(HTLP)指数,表征高温少雨天气(表 1).

代码	名称	定义	单位
TXx	最高气温	年、月最高气温的最大值	°C
SU	夏日日数	日最高气温>25 ℃的天数	d
TX90p	暖昼	日最高气温>90%分位值的日数百分比	0⁄0
WSDI	持续暖日日数	连续 6 d 以上最高气温>气候 90%分位值的日数	d
HTLP	夏日少雨日数	日最高气温>25 ℃,且该日降水<3 mm的日数	d

表1 极端温度指数定义

1.3 大气视热源计算方法

本文使用倒算法计算大气视热源.视热源倒算法最先由 Yanai 等^[25]提出,计算方法为:

$$Q_{1} = c_{p} \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T + \left(\frac{p}{p_{0}} \right)^{k} \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right]$$
(1)

$$\langle Q_1 \rangle = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} Q_1 \mathrm{d}p \tag{2}$$

式中, Q_1/c_p 为各层的非绝热加热率(单位: K/s); $\langle Q_1 \rangle$ 为整层垂直积分的大气视热源(单位: W/m²); T为大气不同高度层温度(单位: K); \vec{V} 为各高度层水平风速(单位: m/s); p和 p_0 分别指代计算数据 大气层气压和地面气压; p_s 和 p_T 分别是地面气压和大气层顶气压; $k=R/c_p$ (单位: J/(kg•K)), R, c_p 分别是干气体常数和定压比热; $\omega \neq p$ 坐标系下的垂直速度(单位: Pa/s); θ 是位温(单位: K), ∇ 为拉 普拉松算子.

1.4 TN 波通量计算方法

本文采用波作用通量(TN 通量)分析对流层高层与大气遥相关型相联系的准定常波传播^[26-27].该通量(W)用于诊断相对于基本气流的波动能量传播,在WKB假设下与波的位相无关,W与群速度的方向 平行,可以用来表征能量的频散方向.W的辐散(辐合)分别对应扰动的增强(减弱),在气压坐标中的计 算公式为:

$$W = \frac{1}{2 |\overline{U}|} \begin{cases} u(\psi_{x}^{'2} - \psi'\psi_{xx}^{'}) + v(\psi_{x}^{'}\psi_{y}^{'} - \psi'\psi_{xy}^{'}) \\ u(\psi_{x}^{'}\psi_{y}^{'} - \psi'\psi_{xy}^{'}) + v(\psi_{y}^{'2} - \psi'\psi_{xy}^{'}) \\ \frac{f}{R\sigma/p} \{u(\psi_{x}^{'}\psi_{p}^{'} - \psi'\psi_{xp}^{'}) + v(\psi_{y}^{'}\psi_{p}^{'} - \psi'\psi_{yp}^{'})\} \end{cases}$$
(3)

式中,W为TN通量, ϕ 为准地转流函数,f为科氏力参数,p为气压,(u, v)为水平风场. | \overline{U} |为基本流的风速, $\sigma = (R\overline{T}/C_{s}p) - d\overline{T}/dp$ 中T为气温, C_{s} 为定容比热容, $\phi'_{x},\phi'_{y},\phi'_{s}$ 的下标x,y,p均表示为偏导数.

2 赤水河流域气候分析

2.1 气候分析、站点资料对比

赤水河周边地形导致气象站点分布不均匀,站点开始有气象记录的年份不同.为统一数据起始年份, 使用 ERA5 再分析资料对赤水河进行气候分析.该数据水平分辨率可达到 0.1°×0.1°,是目前精度最高的 再分析数据.

选取 1979-2020 年共 42 年的台站逐日资料为样本,再分析仁怀等 9 个台站经纬度点资料.分别确定 各变量的相关值,结果如图 1 所示.



红色(绿色)区域分别为通过 99.9%置信区间(90%置信区间)检验.



由图1可知,日均温相关系数最高,多数达0.8以上,通过99.9%置信区间检验的显著相关.但是,仁 怀、金沙、古蔺、合江站点有的数据未能通过90%置信区间检验,与总量为365 d 的样本相比异常值所占 比例不大,且在春夏两季出现较少,由此判定 ERA5 日均温资料在赤水河流域具有可信性.而日最高温相 关系数低于日均温,在0.8上下浮动,除合江站点外全部通过99.9%置信区间检验,合江站点的数据不稳 定主要出现在10月下旬至11月初之间,春夏两季的稳定性高于日均温,后续日高温计算极端指数可用 ERA5 资料代替台站资料.日最低气温变量波动幅度在3组变量中最大,部分数据处于90%~99.9%置信 水平范围内.10月至11月 ERA5 与台站资料的变量在合江站点相关性并不强,所以不考虑用 ERA5 数据 计算极端低温指数.夏季日降水变量相关性总体通过99.9%置信区间检验,威信、镇雄、合江资料在7月 末至8月中旬相关性降低.但 ERA5 夏季日降水资料仍具有一定的可信度,为降低异常值影响,后续需对 降水场做季节平均处理.

对1月至12月温度做 EOF(Empirical Orthogonal Function)分析,发现在2000 年后均有变暖趋势,2 月至9月变暖明显,10月至2月微弱增暖.在模态分布上,10月至6月中国除西藏以外地区增暖,3月增 暖速度开始加快.7月由于青藏高原大地形,高原热源迅速发展^[25,28-30].贵州与中国变化趋势一致,春夏两 季增暖幅度明显.结合 ERA5 与台站资料相关结果,在增暖更明显的夏季使用 ERA5 日最高温计算4类极 端指数,从强度、频率等方面分析流域周边的高温变化.

2.2 赤水河流域夏季温度、降水变化

对赤水河流域夏季温度做 EOF 分析.由于所选研究区域较小,环境变量差异小,EOF1 占解释方差的 95.57%,远高于 EOF2 的 2.99%.由于 EOF2 解释方差过小,仅作为 EOF1 的参考.EOF1 为分布一致的 暖模态,由于赤水河附近温度更高,流经习水后高温分布范围更广,因此 EOF2 中有同样的分布体现.赤 水河流经区域温度较南部更高,呈北暖南冷态势,易盛行偏东热成风,阻碍输送印度洋水汽的西南风发展, 导致该地夏季少雨^[31-32].EOF1 在 2005 年转为正位相分布并逐年增强,未来高温少雨的天气类型可能会持 续维持.

本文计算极端高温指数(图 2),探究赤水河流域增暖是否易出现极端高温.极端指数可以分为 3 类:极 值指数代表 1 个季节或 1 年内的最大值或最小值(*TXx*);绝对指数指气温值低于或高于某固定阈值的日数 (*SU*);相对指数为基于百分位阈值的日数(*Tx*90*p*、*WSDI*).通过 3 类指数从强度、频率、持续时间来分 析赤水河流域极端高温事件变化趋势.*SU*(图 2a)由东北向西南减弱.赤水河起始段(威信、镇雄、毕节)温 度较低,进入古蔺后温度开始升高,在赤水河末段(赤水、合江)温度达到顶峰.起始段夏季达到 25 ℃的天 数在 10 d 以内;中段(古蔺、金沙、仁怀、习水)达 20~30 d;末端在 40 d 以上,占夏季的 40%~50%.空 间降维后时间序列显示,整个流域呈增暖趋势.其中,2006 年、2013 年、2022 年异常偏暖,总日数达 30 d 以上,占夏季的 1/3. *TXx*(图 2b)表现出与 *SU* 相同的空间分布,区别在于中段增暖更强,与末端温度差 距减小.时间序列呈缓慢增暖趋势.为去除历史温度一直偏高的影响,本文选取 *TX*90*p* 相对指数进行研 究(图 2c).对比历史数据增暖情况,发现镇雄、威信、毕节 3 地温度有所上升,相较于流域其他区域依旧偏 低,增暖趋势明显,2006 年、2013 年、2022 年异常偏暖.根据 *WSDI*发现赤水河流域持续暖期出现频率较 少,在 5%以下.仁怀、古蔺交界处及习水东部暖期持续频率较高.*HTLP* 与*SU* 指数空间、时间信号分布 变化趋势一致,即满足 *SU* 指数条件时,对 *HTLP* 指数同样满足.赤水河流域高温、干旱事件总是同时出 现,复合干热极端事件强度、频率逐年增高.



e. HTLP指数时间序列(黑色虚线为趋势线)

143

图 2 1979-2022 年夏季 4 类极端指数空间分布(左列)及时间序列变化(右列)

4 组高温极端指数(SU,TXx,TX90p,WSDI)分布均为由东北向西南减弱.序列图增暖趋势明显, 2022 出现超强连续高温.赤水河流域中段的酱香白酒酿造技术是多菌固态发酵、开放式制曲和堆积发酵等 微生物必不可少的工艺,酿造环境中必然大量存在与发酵相关的微生物^[33].Wang等^[34]发现茅台酒发酵酒 醅中多种微生物来源于大曲、窖泥、原料和环境(空气、灰尘和地面等).罗方雯等^[35]应用高通量技术从酱 香白酒酿造区域环境和大曲中检测到多种酵母,且大曲中90%以上的酵母来源于环境.培养温度、pH值、 水分含量、氧化应激、渗透压、产物浓度等因素能够影响酿酒酵母菌的生长特性.酿酒酵母菌在培养基初 始 pH值为4.0~6.0,温度为25~30℃时生长良好^[36-39].赤水河流域中段较长的高温日数和温度非常适 宜酵母菌生长.

夏季降水 EOF 与温度分布类似. EOF1 单极子分布, 解释方差达 71.96%, 为赤水河流域夏季降水的 主要模态,显示赤水河从云南进入贵州少雨区,中下段严重少雨. 2000 年赤水河流域向少雨模态转变, 2005 年模态转为少雨正位相, 该流域呈干旱状态.

利用 PC1(Principal Component Analysis 1)表征流域降水干旱变化的特征指数,研究极端指数与降水 相关关系.图 3显示 4 类极端指数与干旱指数呈显著正相关.赤水河流域温度、降水水位在 2005 年发生转 变,温度升高伴随降水减少的高温干旱信号加强,高温事件强度、发生频率逐年上涨.季节平均后发现赤 水河流域易出现伴随连续性高温的整个流域干旱现象.威信、镇雄、毕节作为起始段高温干旱天气出现次 数较少,中段出现频率增多,周边更高温天气则显著.



27° N 104° E 105° E 106° E $107^{\circ} E$ $104^{\circ} E$ 105° E 106° E 107° E c. TX90p指数 d. WSDI指数 -0.8 -0.4 0 0.4 0.8 色标

黑色打点为通过 95%置信区间检验.

图 3 极端指数与干旱指数的相关性

27° N

赤水河流域春季开始增温,高原从冬季冷源转变为夏季热源.热源变化是高原上空热力场发生季节转变的一个重要标志^[25,29,40-42],对后期夏季大气环流转换产生影响.为探究高原在春季热力转化过程中对位于下游的赤水河流域的影响,本文对1979-2022年青藏高原及周边地区的春季热源做DEOF(Distinct EOF)分析(图4、图5).DEOF从EOF模态中剔除噪声影响,得到包含物理信息更多的DEOF模态. DEOF1呈高原暖周边冷分布,春季高原东部最先开始加热的结论与以往研究一致^[43-44],主体为东北一西南走向"一十一"三极子分布.DEOF2显示出不均匀的冷热源交替状态,东北一西南热冷源对峙情况较DEOF1有所减弱.



EOF1-2 模态分布(第1列),零假设过程1-2 模态分布(第2列),DEOF1-2 模态分布(第3列),黑色加粗实线为3000 m 海拔线,EOF, DEOF 模态右上角数字为对应的方差贡献,零假设过程右上角数字为对应的 EOF/DEOF 模态环境噪声.

图 4 1979-2022 年高原及周边地区春季热源

DPC1(Distinct PC1)呈准年代际变化,2000年后位相转换,并逐年加强.赤水河流域春季温度 EOF 显示,2000年后该流域增暖,与春季高原模态转变时间一致.为探究春季热源影响赤水河流域的机制, 我们计算了 DPC1序列与 500 hPa 位势、300 hPaTN 波通量的相关性(图 6).前冬(图 6a)高原东部 TN 波通量向下游地区传输,使下游地区位势升高,导致高原对下游地区的影响较弱.春季(图 6b)热源加 强,对下游输送的波通量增强.夏季(图 6c)高原热源显著增强,对大气的抽吸作用显著,高原能量传输 有所减弱.流域中段 6 月显示出加热趋势,7 月初达到最强,后续以减弱变化为主,与 TN 波通量随季节 变化规律相同(春季热源增强,影响下游地区;夏季高原波作用减弱,影响中南半岛等地区,流域热源转 为变冷趋势).赤水河流域受到来自中南半岛地区的能量传输,大致位于脊前槽后区域,不利于获取降 水,以下沉增温运动为主^[45].由图 7 可知,春季热源为"-+-"分布,常有下游降水偏少,温度偏高, 大范围高温于旱现象发生.



图 5 1979-2022 年高原及周边地区春季热源 DEOF 前 2 个模态对应的时间序列(左列)、EOF 分析前 2 个模态对应的时间序列(右列)



a. 前冬(DJF, Decembe-January-February); b. 春季(MAM, March-April-May); c. 夏季(JJA, June-July-Augst).

图 6 1979-2022 年春季热源 DPC1 与 500 hPa 位势(填色图)和 300 hPa TN 波通量(矢量图)的相关系数分布



图 7 白色网格区域为通过 95% 置信区间检验的区域

3 结果与讨论

本文对比站点和再分析数据,确定了 ERA5 在赤水河流域的泛用性.赤水河流域地形复杂,ERA5 的 高分辨率再分析资料很好地弥补了台站分布不均、地理位置受限的短板.通过 EOF、极端指数等分析了 1979-2022 年赤水河流域温度、降水、高温热浪气候特征、模态分布及变化趋势.得出以下结论:

1)根据极端事件空间分布可以将赤水河流域气候区分为3段:起始段(威信、镇雄、毕节),该地温度 较低,干旱现象不明显;中段(仁怀、古蔺、习水、金沙)温度开始上升,降水有所减少,持续高温现象发生 较为频繁;末段(赤水、合江)高温事件强度最高,干旱明显,蒸腾作用显著.流域内极端高温与降水呈负相 关关系,高温越强,地区干旱现象更严重.2005年后赤水河流域北暖南冷的经向温度梯度,不利于夏季西 南风的发展,导致流域地区干旱少雨.随着全球气候变化,近年来赤水河流域夏季发生复合干热极端事件 的风险正在增加.

2) 青藏高原上下游效应影响赤水河流域温度、降水气候变化,春季热源"-+-"模态分布,对同期下游波通量输送最强,引发流域持续增暖至夏季8月中旬.夏季高原热力性质最强,对流层中上层为一致热源,抽吸作用加强.流域上空常为脊前槽后,以负变高下沉运动为主,不利于获取降水,大范围高温干旱事件发生概率上升.

参考文献:

- [1] MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, PIRANI A, et al. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M] //LONNOY J B R, MATTHEWS T K, MAYCOCK T, et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] 翟盘茂,刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾 [J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 55-63, 84.
- [3] 刘东,白镜筱,张亮亮,等. 基于 GOA-RCMSE 模型区域降水复杂性测度分析 [J]. 东北农业大学学报(自然科学), 2023,54(9):67-79.
- [4] 付奔,李代华,雷腾云,等.盘龙河流域极端降水时空变化特征分析 [J].云南农业大学学报,2022,37(4):720-727.
- [5] RUSSO S, DOSIO A, GRAVERSEN R G, et al. Magnitude of Extreme Heat Waves in Present Climate and Their Projection in a Warming World [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(22): 12500-12512.
- [6] LEONARD M, WESTRA S, PHATAK A, et al. A Compound Event Framework for Understanding Extreme Impacts [J].

WIREs Climate Change, 2014, 5(1): 113-128.

- [7] CHEN Y, MOUFOUMA-OKIA W, MASSON-DELMOTTE V, et al. Recent Progress and Emerging Topics on Weather and Climate Extremes since the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [J]. Annual Review of Environment and Resources, 2018, 43: 35-59.
- [8] SIPPEL S, REICHSTEIN M, MA X L, et al. Drought, Heat, and the Carbon Cycle: A Review [J]. Current Climate Change Reports, 2018, 4(3): 266-286.
- [9] RIBEIRO A F S, RUSSO A, GOUVEIA C M, et al. Risk of Crop Failure Due to Compound Dry and Hot Extremes Estimated with Nested Copulas [J]. Biogeosciences, 2020, 17(19): 4815-4830.
- [10] ZHOU C L, WANG K C. Coldest Temperature Extreme Monotonically Increased and Hottest Extreme Oscillated over Northern Hemisphere Land during last 114 Years [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 25721.
- [11] FREYCHET N, TETT S, WANG J, et al. Summer Heat Waves over Eastern China: Dynamical Processes and Trend Attribution [J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(2): 024015.
- [12] DING T, QIAN W H. Geographical Patterns and Temporal Variations of Regional Dry and Wet Heatwave Events in China during 1960-2008 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28(2): 322-337.
- [13] YAN Z W, XIA J J, QIAN C, et al. Changes in Seasonal Cycle and Extremes in China during the Period 1960-2008 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28(2): 269-283.
- [14] DONG B W, SUTTON R T, SHAFFREY L. Understanding the Rapid Summer Warming and Changes in Temperature Extremes since the Mid-1990s over Western Europe [J]. Climate Dynamics, 2017, 48(5): 1537-1554.
- [15] 徐金芳, 邓振镛, 陈敏. 中国高温热浪危害特征的研究综述 [J]. 干旱气象, 2009, 27(2): 163-167.
- [16] 谈建国,陆晨,陈正洪. 高温热浪与人体健康 [M]. 北京: 气象出版社, 2009: 50-68.
- [17] LI Y, DING Y H, LI W J. Observed Trends in Various Aspects of Compound Heat Waves across China from 1961 to 2015 [J]. Journal of Meteorological Research, 2017, 31(3): 455-467.
- [18] 肖安,周长艳. 基于超热因子的中国热浪事件气候特征分析 [J]. 气象, 2017, 43(8): 943-952.
- [19] 齐冬梅,周长艳,李跃清,等.西南区域气候变化原因分析 [J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(1): 35-42.
- [20] 刘琳,徐宗学.西南5省市极端气候指数时空分布规律研究 [J].长江流域资源与环境,2014,23(2):294-301.
- [21] 朱大运, 熊康宁, 肖华. 贵州省极端气温时空变化特征分析 [J]. 资源科学, 2018, 40(8): 1672-1683.
- [22] 马柱国, 符淙斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析 [J]. 气象学报, 2001, 59(6): 737-746.
- [23] 葛非凡,毛克彪,蒋跃林,等. 华东地区夏季极端高温特征及其对植被的影响 [J]. 中国农业气象, 2017, 38(1): 42-51.
- [24] KINIRY J R. Kernel Weight Increase in Response to Decreased Kernel Number in Sorghum [J]. Agronomy Journal, 1988, 80(2): 221-226.
- [25] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. ERA5 Monthly Averaged Data on Pressure Levels from 1979 to Present(C3S) Climate Data Store (CDS) [R/OL]. (2018-10-27) [2023-02-21]. https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#! /dataset/10.24381/cds.bd0915c6? tab=overview.
- [26] ALEXANDER L V, ZHANG X, PETERSON T C, et al. Global Observed Changes in Daily Climate Extremes of Temperature and Precipitation [J]. Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 2006, 111(D5): D05109.
- [27] YANAI M, LI C F, SONG Z S. Seasonal Heating of the Tibetan Plateau and Its Effects on the Evolution of the Asian Summer Monsoon [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II, 1992, 70(1B): 319-351.
- [28] TAKAYA K, NAKAMURA H. A Formulation of a Wave-Activity Flux for Stationary Rossby Waves on a Zonally Varying Basic Flow [J]. Geophysical Research Letters, 1997, 24(23): 2985-2988.
- [29] TAKAYA K, NAKAMURA H. A Formulation of a Phase-Independent Wave-Activity Flux for Stationary and Migra-

tory Quasigeostrophic Eddies on a Zonally Varying Basic Flow [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2001, 58(6): 608-627.

- [30] FLOHN H. Large-Scale Aspects of the "Summer Monsoon" in South and East Asia [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II, 1957, 35A: 180-186.
- [31] MINOURA D, KAWAMURA R, MATSUURA T. A Mechanism of the Onset of the South Asian Summer Monsoon [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II, 2003, 81(3): 563-580.
- [32]郑然,刘嘉慧敏,王春学,等.华西南区秋雨异常及其对青藏高原冬季大气冷源的响应[J].干旱气象,2021,39(2): 225-234.
- [33] 竺可桢. 东南季风与中国之雨量 [J]. 地理学报, 1934(1): 1-27, 197.
- [34] 罗连升,段春锋,毕云,等.春季青藏高原大气热源与长江中下游盛夏高温的关系 [J]. 气象科学,2016,36(5): 614-621.
- [35] 周恒刚. 酱香型白酒生产工艺的堆积 [J]. 酿酒科技, 1999(1): 5-7.
- [36] WANG Q, ZHANG H X, LIU X. Microbial Community Composition Associated with Maotai Liquor Fermentation [J]. Journal of Food Science, 2016, 81(6): M1485-M1494.
- [37] 罗方雯,黄永光,涂华彬,等. 基于高通量测序技术对茅台镇酱香白酒主酿区域酵母菌群结构多样性的解析 [J]. 食品 科学,2020,41(20):127-133.
- [38] ACEITUNO F F, ORELLANA M, TORRES J, et al. Oxygen Response of the Wine Yeast Saccharomyces Cerevisiae EC1118 Grown under Carbon-Sufficient, Nitrogen-Limited Enological Conditions [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, 78(23): 8340-8352.
- [39] WOO J M, YANG K M, KIM S U, et al. High Temperature Stimulates Acetic Acid Accumulation and Enhances the Growth Inhibition and Ethanol Production by Saccharomyces Cerevisiae under Fermenting Conditions [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, 98(13): 6085-6094.
- [40] BOONS K, NORIEGA E, VERHERSTRAETEN N, et al. The Effect of Medium Structure Complexity on the Growth of Saccharomyces Cerevisiae in Gelatin-Dextran Systems [J]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 199: 8-14.
- [41] 刘龙海,李新圃,杨峰,等. 酿酒酵母菌生长特性的研究 [J]. 中国草食动物科学, 2016, 36(3): 38-41.
- [42] 张耀存, 钱永甫. 南海季风区地面温度变化特征及其与季风爆发的联系 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(2): 192-198.
- [43] 晏红明, 杞明辉, 肖子牛, 等. 冬季亚洲大陆的热力差异对亚洲季风活动的影响 [J]. 大气科学, 2005, 29(4): 549-564.
- [44] 刘鹏, 钱永甫, 严蜜. 东亚下垫面热力异常与南海夏季风爆发早晚和强弱的关系 [J]. 热带气象学报, 2011, 27(2): 209-218.
- [45] 孙颖,丁一汇. 青藏高原热源异常对 1999 年东亚夏季风异常活动的影响 [J]. 大气科学, 2002, 26(6): 817-828.
- [46]梁潇云,刘屹岷,吴国雄.青藏高原隆升对春、夏季亚洲大气环流的影响 [J].高原气象, 2005, 24(6): 837-845.
- [47] 朱乾根,林锦锐,寿绍文,等.天气学原理和方法 [M].3版.北京:气象出版社,2000.

责任编辑 夏娟