

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.05.003

长江流域 1960—2019 年蒸发皿蒸发和实际蒸散发演变规律

叶林媛^{1,2}, 鲁 汉³, 秦淑静^{1,2}, 张 櫓^{1,2}, 熊立华^{1,2},
刘 攀^{1,2}, 夏 军^{1,2}, 程 磊^{1,2}

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室(武汉大学), 湖北 武汉 430072; 3. 湖北省电力勘测设计院有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 蒸发是地表水量平衡和能量平衡联结的纽带, 研究长江流域蒸发的变化趋势对于区域水文循环变化、水资源管理至关重要。利用 PenPan 模型分析了 1960—2019 年长江流域蒸发皿蒸发量的时空演变规律及其驱动机制, 并基于最新发展的广义蒸发互补关系探究了长江流域实际蒸散发的演变特征。结果表明: ① 长江流域的蒸发皿蒸发和实际蒸散发在 1990 年前后均存在先下降后增加的趋势。风速和辐射下降是 1990 年以前蒸发皿蒸发下降的主导因子, 气温升高和相对湿度下降是 1990 年后蒸发皿蒸发上升的主导因子。② 长江流域两大主要气候区(高原气候和亚热带气候区)蒸发皿蒸发在 1990 年前后也存在趋势反转现象, 但时空变化特征和驱动机制差异明显。1960—1989 年, 高原气候区气温和辐射是蒸发皿蒸发变化的主导因子; 亚热带气候区风速和辐射是蒸发皿蒸发下降趋势的主导因子。③ 1990—2019 年, 高原气候区气温升高、风速增加和相对湿度减少是蒸发皿蒸发上升趋势的主导因素; 亚热带气候区气温升高和相对湿度降低是蒸发皿蒸发增加的主要原因。研究结果可为长江流域水循环变化和水资源配置等研究提供参考。

关键词: 蒸发皿蒸发; 实际蒸散发; 蒸发互补关系; 归因分析; 长江流域

中图分类号: P332.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2022)05-0718-12

蒸发是水循环和能量循环的关键要素, 其长期变化趋势及其表征的区域水循环变化特征是当今水文科学领域的热点问题^[1-2]。蒸发皿蒸发是大气蒸发能力的直接观测。过去的半个世纪全球气候持续变暖, 但在全球许多国家却观测到蒸发皿蒸发呈现下降趋势, 这种蒸发皿蒸发与气温变化趋势相反的现象称为蒸发悖论(Evaporation paradox)^[3-5]。长江流域是中国社会经济高度发达的地区之一, 近些年, 长江流域水旱灾害频发, 除人类活动因素外, 气候变化所引发的水文循环变化是主要原因^[6]。因此, 探究长江流域蒸发量的变化趋势对于区域水文循环变化、水资源管理至关重要。

蒸发悖论现象及其形成机理在时间和空间上存在明显的变异性。近年来研究发现, 20 世纪 90 年代后蒸发皿蒸发产生了新的变化趋势。Ruiz-Alvarez 等^[7]发现墨西哥自 1990 年后蒸发皿蒸发呈现上升趋势; 朱晓华等^[8]发现在 1961—1993 年期间, 中国地区存在蒸发悖论现象, 1994—2007 年蒸发悖论现象消失。全球范围内云量或气溶胶增加引起的入射辐射量下降以及陆面风速的降低被认为是蒸发皿蒸发量下降的主要原因, 但在不同的地区也有不同的变化和贡献度^[9-10]。长江流域气候类型众多, 蒸发皿蒸发变化在空间上存在差异, 影响蒸发皿蒸发量的原因也有所不同。研究发现长江中下游蒸发皿蒸发量下降现象明显, 而上游下降程度较小^[11]。王艳君等^[12]发现 1961—2001 年长江流域蒸发整体呈现下降的趋势, 主要是由太阳净辐射和风速的下降引起的; 宋萌勃等^[13]发现 1950—2001 年长江流域蒸发皿蒸发呈现下降趋势, 主要是由水汽压增加和日照

收稿日期: 2022-05-05; 网络出版日期: 2022-09-09

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20220909.1057.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41890822; 51879193)

作者简介: 叶林媛(1996—), 女, 河南平顶山人, 博士研究生, 主要从事生态水文学研究。

E-mail: yelinyuan@whu.edu.cn

通信作者: 程磊, E-mail: lei.cheng@whu.edu.cn

时间减少导致的。因此, 亟待对长江流域长期蒸发皿蒸发的时空变化规律进行系统分析并进一步解析其驱动机制。

受观测环境的影响和技术水平的限制, 一些地区未能布设蒸发皿或部分布设蒸发皿的地区存在缺测现象。中国运用的 D20 型蒸发皿观测一般截止到 2001 年, 现中国常规使用 D20(圆形)和 E601B(锥形)型 2 种蒸发皿, 这 2 种蒸发仪器的折算系数存在空间差异性^[14]。部分实测数据的缺失和 2 种蒸发仪器之间的转换误差, 一定程度上降低了蒸发皿实测数据的可用性。PenPan 模型和最新发展的广义蒸发互补关系是探究蒸发皿蒸发变化趋势的有效工具, PenPan 模型是针对蒸发皿蒸发计算改进的 Penman 方法, 利用基本气象指标就可以准确地估算蒸发皿蒸发量, 可以在一定程度上弥补蒸发皿实测法的不足^[15]。Brutsaert 等^[16]指出, 观察到的蒸发皿蒸发量下降不一定预示着实际蒸散发下降, 在非湿润的环境中, 蒸发皿蒸发的减少实际上可能象征陆地实际蒸散发增加。此后, 蒸发互补原理被广泛用于蒸发皿蒸发变化研究中, 但是一般采用发展较早的平流-干旱(简称 AA)模型, 其存在干旱环境下低估、湿润环境下高估实际蒸散发的的问题^[17]。广义蒸发互补方法作为蒸发互补原理的最新发展形式, 物理机制更严谨, 可以用于研究蒸发皿蒸发和实际蒸散发的变化趋势^[18]。

本文以中国最大流域长江流域为研究区域, 在对历史 60 a 蒸发皿蒸发观测数据一致性及质量控制的基础上, 基于修正后的 PenPan 模型模拟长江流域蒸发皿蒸发量, 分析蒸发皿蒸发时空演变规律及其趋势, 探究不同时段蒸发皿蒸发变化的成因, 并基于广义蒸发互补关系探究长期实际蒸散发的时空变化特征。研究成果以期对长江流域水资源配置、水循环变化研究和未来气候变化预测提供参考。

1 研究区域与数据方法

1.1 研究区域

长江流域发源于青藏高原腹地, 流域总面积达 180 万 km², 是世界第三大流域。长江全长约 6 397 km, 上游为长江源头至宜昌市, 中游为宜昌至湖口一段, 下游为湖口以下至长江入海口。基于中国大陆气候区划, 长江流域为温带、亚热带和高原 3 个气候区, 其中亚热带气候区又可划分为北亚热带气候区和中亚热带气候区, 由于温带气候区面积过小, 因此将其与亚热带气候区合并研究(图 1)。

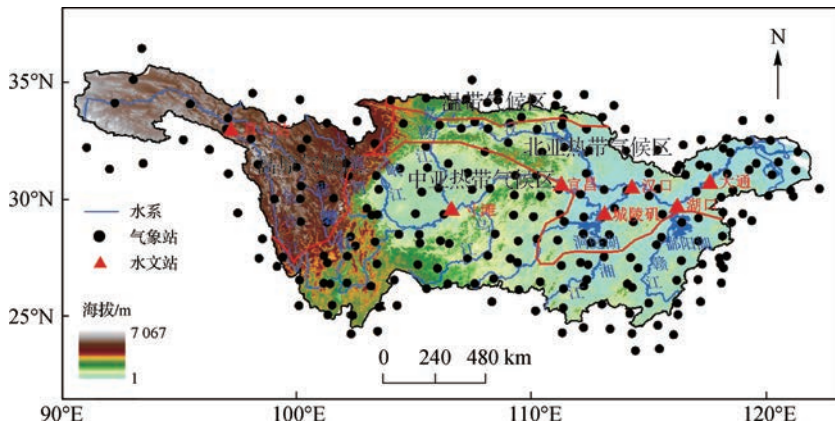


图 1 长江流域气候区划和气象站空间分布

Fig. 1 Maps of climatic regions and meteorological stations in the Yangtze River basin

1.2 数据资料

本研究采用来自国家气象科学数据中心(<http://www.nmic.cn/>)中国地面气候资料日值数据集, 数据集

中包含了基准及基本气象站点降雨(P)、气压(P_{RS})、气温(T_a)、蒸发皿蒸发量(E_{pan})、相对湿度(H_R)、风向风速(u)和日照时数(D_{SS})共7种气象要素的日值数据。本研究选取1960—2019年长江流域内170个站点数据,并补充流域周边约30%站点用于消除统计误差和边缘效应,共228个站点,其中,高原气候区包含33个站点,亚热带气候区包括195个站点(图1)。

对于蒸发皿蒸发量的观测,20世纪50年代至21世纪初,中国区域广泛采用D20型蒸发皿(20 cm直径)。在2002年前后,开始使用E601B型蒸发皿(62 cm直径)代替D20型蒸发皿。由于E601B型蒸发皿在水冻结时(主要是北方地区的冬季)无法使用,因此在中国大部分区域在非冻结期选择使用E601B型蒸发皿,在冻结期同时使用D20型蒸发皿^[14]。不同类型蒸发皿的结构、放置方式等并不相同,测得的蒸发量也存在差别,D20型蒸发皿蒸发量比E601B型同期蒸发量明显偏大。因此,为了得到一致的蒸发皿蒸发量,采用校正系数对2种蒸发皿测得的蒸发量进行数据均一化:

$$E_{20} = (E_{601B} - b) / k \quad (1)$$

式中: E_{20} 为D20型蒸发皿蒸发量,mm; E_{601B} 为E601B型蒸发皿蒸发量,mm; k 为校正系数; b 为常数项。对于不同站点,其校正系数也不相同,本研究根据每个站点使用2种类型蒸发皿在相同时期测得的蒸发皿蒸发量,通过线性回归得到每个站点的校正系数,从而将E601B型蒸发皿蒸发量校正为D20型蒸发皿蒸发量。

以宜昌站为例,图2展示了校正前后年蒸发皿蒸发量的变化。校正前宜昌站在2002年前主要为D20型蒸发皿蒸发量,2002年后主要为E601B型蒸发皿蒸发量。1960—2002年多年平均蒸发皿蒸发量约为1312.3 mm,2002—2019年的多年平均蒸发皿蒸发量约为801.5 mm,年蒸发量明显低于2002年前的D20型蒸发皿蒸发量。校正后2002—2019年多年平均蒸发皿蒸发量约为1330.3 mm,蒸发量显著提高,经过均一化校正后前后两阶段差异明显减少,2种蒸发皿蒸发被均一化为D20型蒸发皿蒸发量。数据均一化后的观测蒸发皿蒸发量能较好地后续模型率定和结果分析做参考。

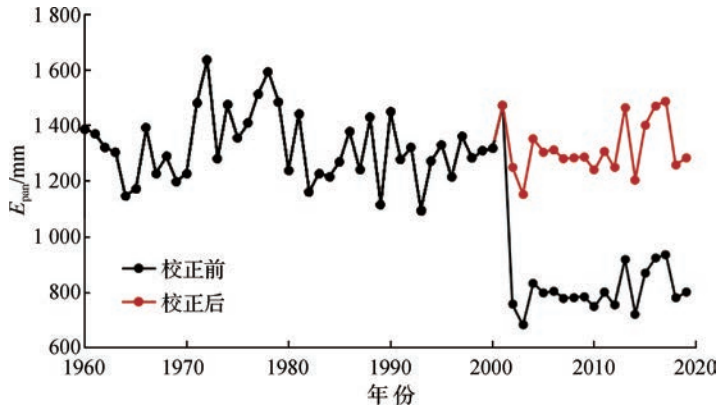


图2 宜昌站2种蒸发皿类型年蒸发量校正前后示意

Fig.2 Changes in annual pan evaporation before and after correction of Yichang station

1.3 研究方法

1.3.1 PenPan 模型

PenPan模型是根据Penman模型、基于蒸发皿的质量和能量平衡建立的用于估算美国Class A型蒸发皿蒸发的模型^[15]。在中国区域,Yang等^[19]对该模型进行改进,建立了适用于中国D20型蒸发皿的PenPan模型,见下式:

$$E_{pan} = E_{p,R} + E_{p,A} = \frac{\Delta}{\Delta + m\gamma} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{m\gamma}{\Delta + m\gamma} f_q(u) \frac{D}{\lambda} \quad (2)$$

式中: $E_{p,R}$ 和 $E_{p,A}$ 分别为蒸发的辐射项和空气动力项,mm; Δ 为饱和水汽压与气温曲线的斜率,kPa/K;

m 为热量—水汽传递的有效面积比 ($m = 5$); γ 为湿度计常数, kPa/K ; R_n 为净辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$; λ 为水的汽化潜热, MJ/kg ; $f_q(u)$ 为风函数, $\text{kg}/(\text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (\text{kPa})^{-1})$, u 为地面 2 m 风速, m/s ; D 为饱和水汽压差, $D = e_s(1 - H_R)$, kPa , e_s 为气温 T_a 时的饱和水汽压, kPa 。参数 Δ 和 λ 的具体计算参见 FAO 的计算方法^[20]。

本研究基于所选站点 ($n = 228$) 气象数据和均一化的 D20 型蒸发皿蒸发数据采用遗传算法对原适合于美国 Class A 型蒸发皿蒸发的风函数(一般形式为 $f_q(u) = a(1 + bu)$)进行优化率定, 率定后的风函数 $f_q(u)$ 形式为

$$f_q(u) = 1.06 \times 10^{-8}(1 + 1.63u) \quad (3)$$

图 3 显示了风函数率定前后长江流域站点的 PenPan 模型模拟蒸发皿日蒸发量和观测值的比较。从图中可以看到, 风函数率定后的模型较率定前蒸发模拟效果有较大提升, 总体上率定后均方根误差 (E_{RMS}) 由 0.77 mm 减小到 0.67 mm, 相关系数 (r) 也略有提高。

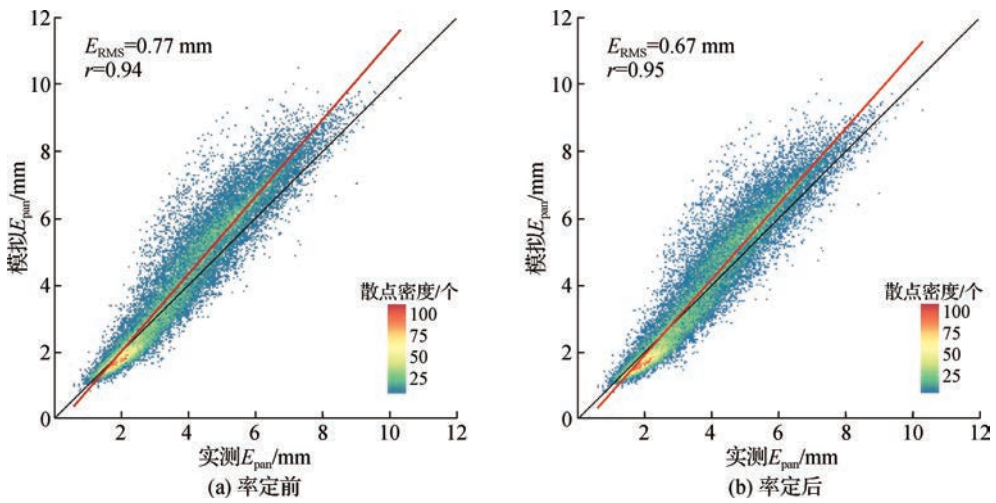


图 3 风函数率定前后的 PenPan 模型模拟与观测的站点日蒸发皿蒸发量对比

Fig. 3 Comparisons between the observed and estimated daily pan evaporation using PenPan model with raw and calibrated wind function

1.3.2 偏微分归因法

偏微分归因 (Partial Differential, PD) 法是一种成熟有效的蒸发皿蒸发趋势变化归因分析的方法^[21]。PenPan 模型蒸发皿蒸发 (E_{pan}) 趋势变化可近似看成由净辐射、气温、风速和相对湿度等 4 种气象要素的贡献量共同组成, 即:

$$\frac{dE_{\text{pan-PD}}}{dt} = \frac{dE_{\text{p,R}}}{\partial R_n} \frac{dR_n}{dt} + \frac{dE_{\text{pan}}}{\partial T_a} \frac{dT_a}{dt} + \frac{dE_{\text{p,A}}}{\partial u} \frac{du}{dt} + \frac{dE_{\text{p,A}}}{\partial H_R} \frac{dH_R}{dt} \quad (4)$$

由此对各项求偏导, 可以将 E_{pan} 的趋势变化归因为 4 种气象要素的贡献。将基于偏微分归因法计算的蒸发皿蒸发趋势变化 ($dE_{\text{pan-PD}}/dt$) 与模拟的蒸发皿蒸发的趋势变化 (dE_{pan}/dt) 进行比较, 以此评估偏微分法的归因结果。

1.3.3 析因数数值实验归因法

析因数数值实验归因 (Experimental Detrending, ED) 法是在对气象要素进行去趋势的基础上, 通过设计一系列的单一气候变化情景 (去除其他要素自变量趋势, 仅保留单一自变量趋势) 实验, 将变化要素趋势定量归因到各个输入要素^[22]。

基于原始观测数据建立的去趋势数据集计算的 E_{pan} 可看作没有气候变化影响情景下的蒸发皿蒸发, 即基准情景下的蒸发皿蒸发量 (E_{Base})。然后控制单一气象要素变量 (f), 计算其在气候变化情形下的蒸发皿蒸发

量($E_{\text{detrnd},f}$)。 $E_{\text{detrnd},f}$ 和 E_{Base} 间趋势差异即为该气象要素在 E_{pan} 趋势变化的贡献(C_f):

$$C_f = \frac{dE_{\text{detrnd},f}}{dt} - \frac{dE_{\text{Base}}}{dt} \quad (5)$$

以此分别计算净辐射、气温、风速和相对湿度4个驱动变量的贡献大小,即 C_{R_n} 、 C_{T_a} 、 C_u 和 C_{H_R} ,4种气象要素贡献之和可视为基于析因数数值实验法归因的 E_{pan} 趋势变化($dE_{\text{pan_ED}}/dt$),即:

$$\frac{dE_{\text{pan_ED}}}{dt} = C_{T_a} + C_u + C_{R_n} + C_{H_R} \quad (6)$$

将析因数数值实验法的结果($dE_{\text{pan_ED}}/dt$)与模拟蒸发皿蒸发趋势分析结果(dE_{pan}/dt)进行比较,用以评估析因数数值实验方法归因结果。

1.3.4 广义蒸发互补关系

蒸发互补理论由 Bouchet^[23]于1963年提出,经过不断发展完善,已经成为估算区域实际蒸散发的基础理论。该理论描述了3种蒸散发量之间的关系:第1种蒸发是区域的实际蒸散发量(E_a);第2种是区域充分供水条件下发生的蒸发,称为潜在蒸散发量(E_{po});第3种是实际条件下,区域内一个小饱和表面上发生的蒸发,可用蒸发皿测得,称为表观潜在蒸散发量(E_{pa})。在水分充足的条件下,所有的净辐射均由蒸散发转化为潜热, E_a 、 E_{pa} 与 E_{po} 相等,即 $E_a = E_{po} = E_{pa}$;而在水分亏缺的情况时, E_a 减小,部分未被蒸散发耗散的净辐射将转化为显热而使得 E_{pa} 增加,三者之间关系为 $E_a < E_{po} < E_{pa}$ 。本研究采用 Brutsaert 等^[18]最新提出的广义蒸发互补模型,该模型公式如下:

$$E_a = \left(\frac{E_{po}}{E_{pa}}\right)^2 (2E_{pa} - E_{po}) \quad (7)$$

式中: $E_{po} = \alpha_c E_e$, α_c 为蒸发互补关系的参数, E_e 为平衡蒸发,计算方式如下:

$$E_e = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Q_{ne} \quad (8)$$

其中:

$$Q_{ne} = \frac{(R_n - G)}{\lambda} \quad (9)$$

式中: Q_{ne} 为可用能量, W/m^2 ; G 为土壤热通量, W/m^2 。在日尺度上, G 可忽略。

参数 α_c 采用 Brutsaert 等^[18]建立的经验统计模型计算:

$$\alpha_c = \frac{a}{[1 + (bK)^c]} \quad (10)$$

式中: $a = 1.496$; $b = 0.2948$; $c = 0.6697$; K 为干旱指数。

E_{pa} 通常可由 Penman 公式计算或者蒸发皿等仪器测得,本研究中采用前文 PenPan 模型模拟的蒸发皿蒸发(E_{pan})。

2 结果与讨论

2.1 蒸发皿蒸发时空分布特征

PenPan 模型模拟的长江流域蒸发皿蒸发量的空间分布规律如图4所示,可以看到长江流域多年平均蒸发皿蒸发量的分布有明显的区域差异性。所有站点($n = 228$)多年平均蒸发皿蒸发量约为1473.8 mm。不同气候区站点的多年平均蒸发皿蒸发量差异较大,其中高原气候区较低约为1215.1 mm,亚热带气候区约为1521.5 mm。高值区域一般在金沙江下游、两湖流域等地区,蒸发皿多年平均蒸发量在2000 mm以上的高值区域出现在中亚热带气候区,低于1000 mm的低值区域分布在高原气候区。本研究模拟的长江流域多年平均蒸发皿蒸发量的空间分布和量级与 Wang 等^[14]采用改进的 PenPan-V3 模型的模拟结果一致。

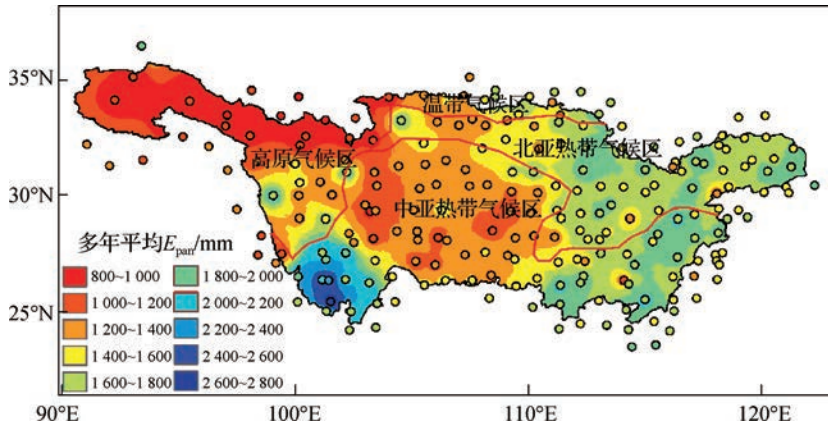
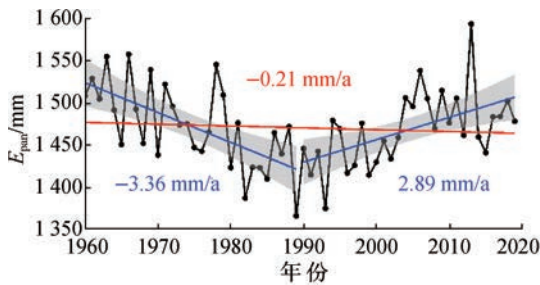


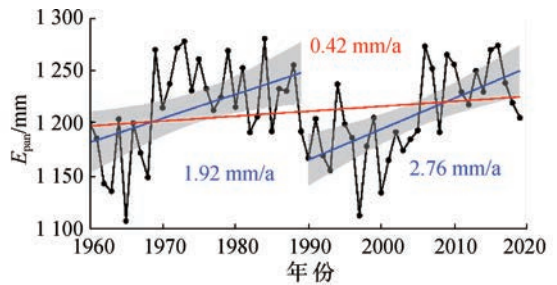
图 4 长江流域站点和基于站点插值的 1960—2019 年多年平均蒸发皿蒸发量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of mean annual pan evaporation of the meteorological stations and the whole Yangtze River basin interpolated from station values from 1960 to 2019

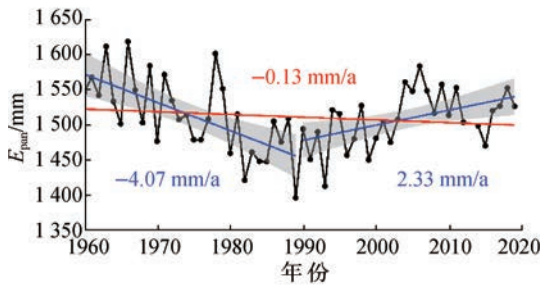
长江流域蒸发皿蒸发量年际趋势变化及其空间分布情况如图 5 和表 1 所示。1960—2019 年长江流域蒸发皿蒸发量总体呈现 0.21 mm/a 的下降趋势(图 5(a)), 约 59.6% 的站点蒸发皿蒸发量下降, 主要在中下游地



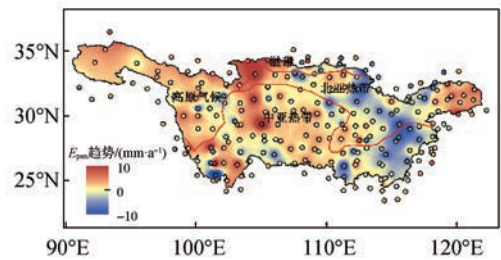
(a) 长江流域站点平均蒸发皿蒸发量的变化趋势



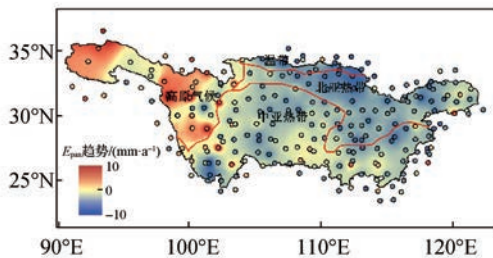
(b) 高原气候区站点平均蒸发皿蒸发量的变化趋势



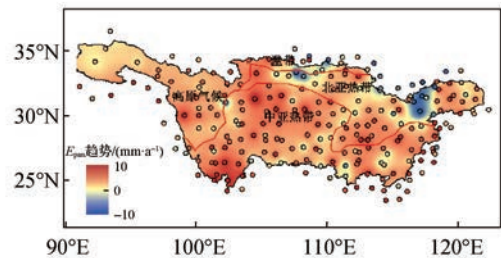
(c) 亚热带气候区站点平均蒸发皿蒸发量的变化趋势



(d) 1960—2019年蒸发皿蒸发量变化趋势空间分布



(e) 1960—1989年蒸发皿蒸发量变化趋势空间分布



(f) 1990—2019年蒸发皿蒸发量变化趋势空间分布

图 5 长江流域蒸发皿蒸发量年际变化趋势及其空间分布

Fig. 5 Trends of pan evaporation and its spatial distribution in different periods in the Yangtze River basin

区(图5(d))。以1990年为转折点,1960—1989年蒸发皿年蒸发量呈现3.36 mm/a的下降趋势,亚热带约87.7%的站点呈下降趋势,60.6%的上升站点集中在高原气候区(图5(e))。1990—2019年蒸发皿年蒸发量呈上升趋势,速率为2.89 mm/a,上升站点广泛分布在全流域内,下降站点少量分布在北亚热带、中亚热带气候区(图5(f))。过去的研究表明,1960年以来长江流域年平均气温呈现持续波动上升趋势^[11],蒸发皿蒸发量的变化趋势表明长江流域在1960—1989年存在蒸发悖论现象,但1990年后该现象消失。

表1 不同时段长江流域不同气候区的年蒸发皿蒸发量变化站点比例变化

Table 1 Changes in stations with increased/decreased annual pan evaporation in different climatic regions of the Yangtze River basin during different periods 单位:%

区域	1960—2019年		1960—1989年		1990—2019年	
	上升	下降	上升	下降	上升	下降
全流域	40.4	59.6	19.3	80.7	78.5	21.5
高原气候区	57.6	42.4	60.6	39.4	97.0	3.0
亚热带气候区	37.4	62.6	12.3	87.7	75.4	24.6

2.2 蒸发皿蒸发时空变化驱动机制

图6为PD法和ED法归因结果与蒸发皿蒸发趋势分析结果比较,可以看到2种方法与趋势分析结果的拟合线都在1:1线附近,在3个时段 $R^2 \geq 0.75$ 。从 R^2 和拟合线与1:1线的接近程度来看,ED法在整个1960—2019年时段的归因结果与趋势分析结果更接近,但在分时段略差于PD法。王婷婷等^[24]对比了ED和PD2种方法在中国区域对蒸发皿蒸发趋势归因的效果,发现ED法比PD法效果更好,这与本文在长江流域整个时期的结论一致。总体上2种方法在长江流域的归因效果较好,使用2种归因分析方法可以更可靠地定量分析 E_{pan} 的趋势变化。

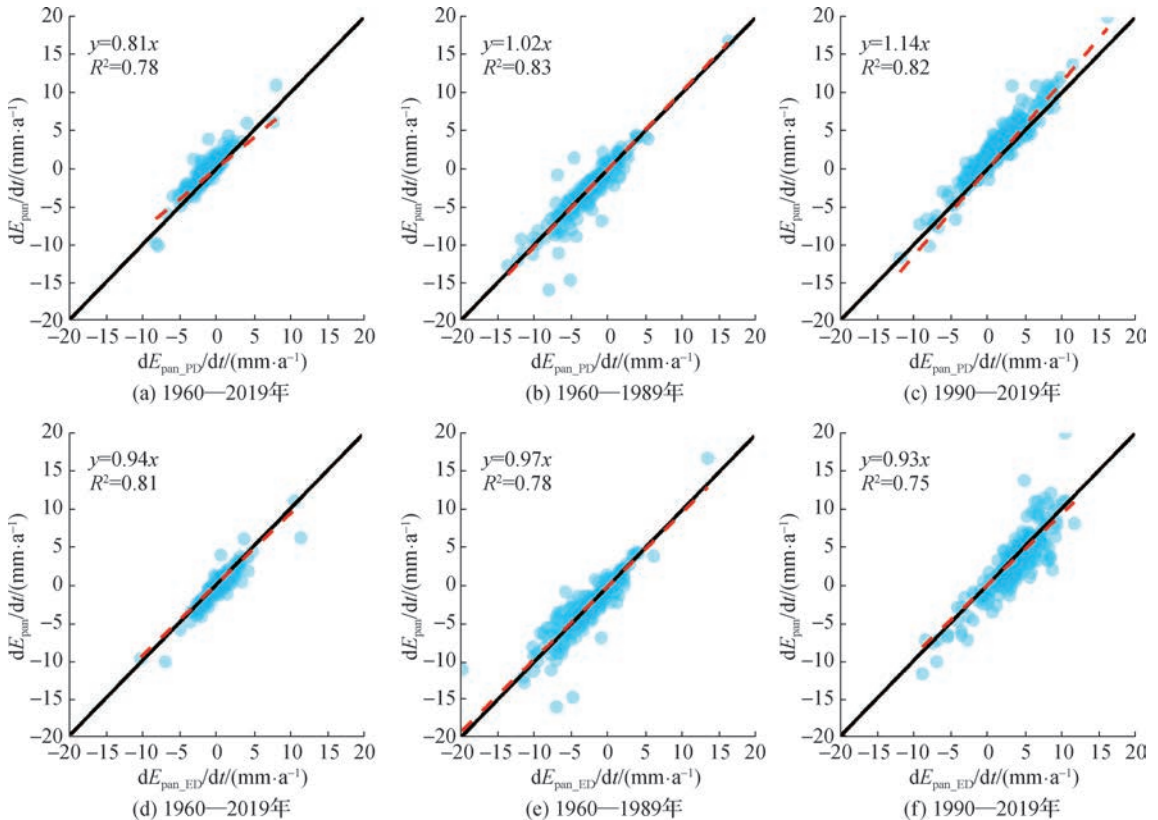


图6 偏微分法和析因数值实验法的归因结果与蒸发皿蒸发趋势分析结果比较

图 7 为长江流域蒸发皿蒸发量变化趋势的归因分析结果。在整个时段(1960—2019 年), 风速和辐射的下降主导长江流域蒸发皿蒸发量的下降趋势, 相对贡献达 55%。风速下降和辐射下降是 1960—1989 年长江流域蒸发皿蒸发量下降趋势的主导因子, 而相对湿度下降和气温升高是 1990—2019 年蒸发皿蒸发量上升趋势的主导因子。长江流域蒸发皿蒸发量变化趋势的归因结果与王艳君等^[12]基于 1951—2000 年 D20 型蒸发皿蒸发在长江流域的研究结论一致, 即净辐射和风速的下降是长江流域蒸发皿蒸发量显著下降的主要原因。在不同时段, 全流域的归因结果与之前对中国区域蒸发皿蒸发量变化的归因研究结果一致^[5], Liu 等^[25]的研究也指出 1992—2007 年气温升高主导了中国 E_{pan} 的变化; Wang 等^[10]指出 1994—2014 年气温和相对湿度分别导致中国的年 E_{pan} 上升 1.12 mm/a 和 2.68 mm/a, 是主导 E_{pan} 变化的因子。风速的影响在 1990 年后减弱, 这与近年来研究发现全球地表风速下降趋势减弱乃至逆转的现象一致^[26]。

长江流域的蒸发皿蒸发量变化趋势在不同时段、不同分区的驱动机制不同。1960—2019 年高原气候区气温升高和相对湿度下降导致年蒸发皿蒸发量变化趋势分别为 1.62 mm/a 和 0.26 mm/a, 风速和辐射的下降导致年蒸发皿蒸发量变化趋势分别为 -0.79 mm/a 和 -0.94 mm/a。亚热带气候区则与高原气候区不同, 风速和辐射下降是蒸发皿蒸发量下降的主要原因, 相对贡献分别为 34% 和 29%。ED 法各气象要素贡献的结论与 PD 法基本一致, 贡献量相差在 0.15 mm/a 以内。1960—1989 年, 高原气候区风速和辐射对蒸发下降趋势的贡献率分别为 4.8% 和 47.8%, 气温和相对湿度对蒸发上升趋势的贡献率分别为 40.3% 和 7.2%; 亚热带气候区风速和辐射对蒸发下降趋势的贡献率分别为 49.1% 和 42.4%, 气温和相对湿度影响相对较小。1990—2019 年, 高原气候区和亚热带气候区蒸发皿蒸发量均呈现上升趋势, 高原气候区气温升高、风速增加和相对湿度减少是蒸发皿蒸发量上升趋势的主导因素, 相对贡献度达 81.1%; 亚热带气候区风速对蒸发皿蒸发量趋势变化贡献很小, 气温和相对湿度的贡献之和(80.2%)显著大于辐射的贡献。

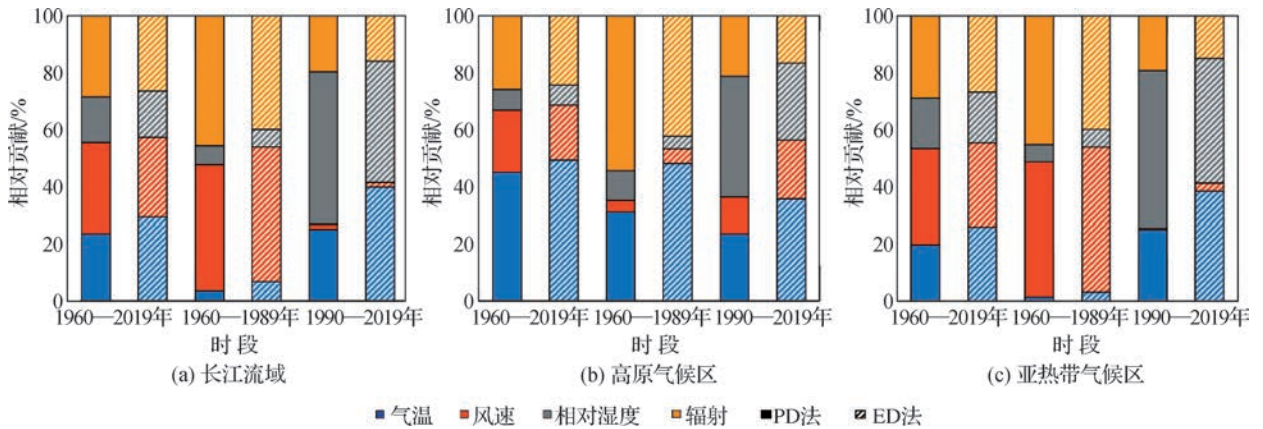


图 7 气象要素对长江流域和不同气候分区蒸发皿蒸发量的贡献度

Fig. 7 Contribution of meteorological factors to pan evaporation in the Yangtze River basin and its different climatic regions

2.3 基于广义蒸发互补关系的实际蒸散发变化规律

基于广义蒸发互补关系得到的 1960—2019 年长江流域站点和基于站点插值的实际蒸散发量分布如图 8 所示。从站点可以看到实际蒸散发量的分布符合由上游向中下游地区逐级增加的规律。高原地区受海陆位置、地形等因素影响, 气候寒冷, 降水稀缺, 受到水分限制, 蒸散发量较少; 而中下游地区属亚热带季风区域, 降水丰富, 辐射量充足。长江流域大部分站点(72.4%)年实际蒸发量为 300~1 000 mm, 所有站点多年平均实际蒸散发量约为 880.7 mm, 插值后多年平均实际蒸散发量约为 804.1 mm。高值站点出现在洞庭湖、鄱阳湖地区, 多年平均蒸散发量在 1 000 mm 以上, 其次是下中游地区, 蒸散发量为 800~1 000 mm, 而高原气候区多年平均蒸散发量在 400 mm 以下。基于站点插值的实际蒸散发与 7 种可公开获得并广泛使用的蒸散发产品(包括 4 种诊断模型产品和 3 种再分析产品)^[27]进行对比, 发现在空间上与常见的蒸散发产品分布一

致；在多年平均实际蒸散发上，广义蒸发互补关系估算的值(804 mm)与其他几种常见的遥感/再分析蒸散发产品的量级范围一致(600 ~ 1 000 mm)。

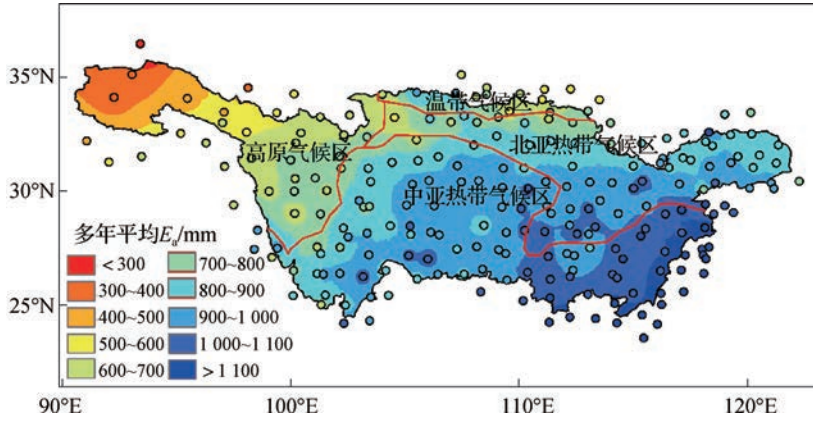
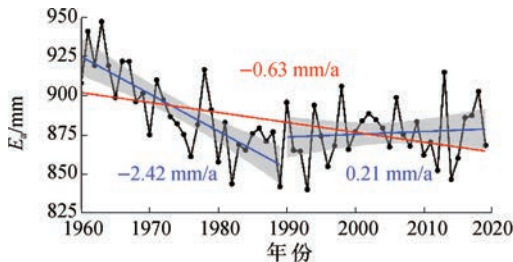


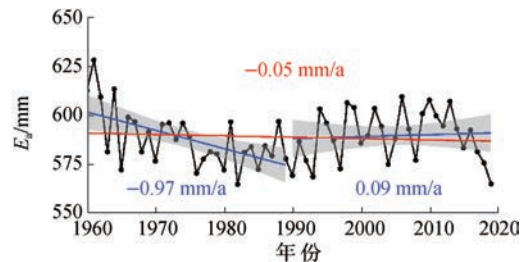
图8 长江流域1960—2019年站点和基于站点插值的多年平均实际蒸散发量空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of mean annual actual evapotranspiration of the meteorological stations and the whole Yangtze River basin interpolated from station values from 1960 to 2019

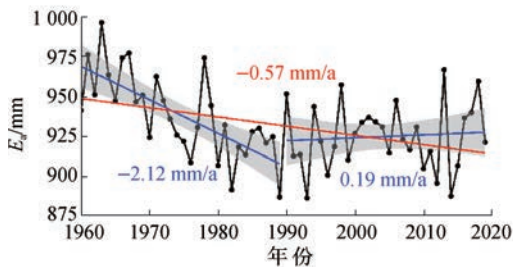
长江流域年实际蒸散发量在1960—2019年总体呈下降趋势，平均下降速率约为0.63 mm/a，呈上升趋势



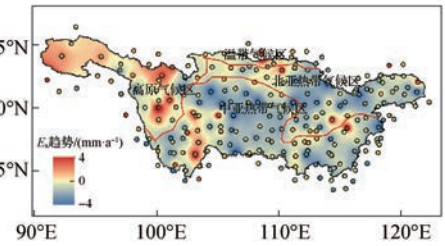
(a) 长江流域站点平均实际蒸散发量的变化趋势



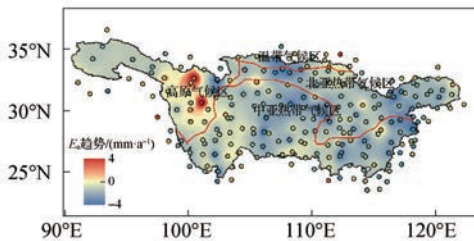
(b) 高原气候区站点平均实际蒸散发量的变化趋势



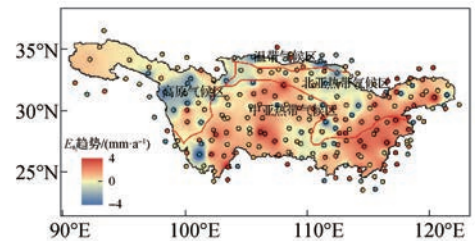
(c) 亚热带气候区站点平均实际蒸散发量的变化趋势



(d) 1960—2019年实际蒸散发量变化趋势空间分布



(e) 1960—1989年实际蒸散发量变化趋势空间分布



(f) 1989—2019年实际蒸散发量变化趋势空间分布

图9 长江流域实际蒸散发量年际变化趋势及其空间分布

Fig. 9 Trends of annual actual evapotranspiration and its spatial distribution in the Yangtze River basin

势的站点在高原气候区, 呈下降趋势的站点多分布在中下游地区(图 9 和表 2)。1960—1989 年流域年实际蒸散发量显著下降, 平均下降速率约为 2.42 mm/a, 其中高原气候区和亚热带气候区分别有 72.7% 和 88.7% 的站点实际蒸散发量下降。而 1990—2019 年实际蒸散发量呈现上升趋势, 速率约为 0.21 mm/a, 高原气候区和亚热带气候区分别有 60.6% 和 68.7% 的站点实际蒸散发量上升。王艳君等^[28] 基于蒸发互补关系原理 AA 模型和海气耦合模式估算得出长江流域 1961—2007 年实际蒸散发量呈现 0.93 mm/a 和 0.36 mm/a 的下降趋势, 这与本研究基于广义蒸发互补关系估算的 0.63 mm/a 下降趋势基本一致。本文基于广义蒸发互补关系估算的长江流域 1990 年后实际蒸散发的变化趋势与鲁汉等^[27] 基于 7 种广泛使用的蒸散发产品发现的 1982—2011 年长江流域实际蒸散发的上升趋势(0.73 ~ 1.36 mm/a) 和 Li 等^[29] 基于机器学习方法估算 1982—2015 年的上升趋势在方向上是一致的, 实际蒸散发趋势与这些研究在量级上的差异主要是研究时段不同导致的。

表 2 不同时段长江流域不同气候区的年实际蒸散发量变化站点比例变化

Table 2 Changes in stations with increased/decreased annual actual evapotranspiration in different climatic regions of the Yangtze River basin during different periods 单位: %

区域	1960—2019 年		1960—1989 年		1990—2019 年	
	上升	下降	上升	下降	上升	下降
全流域	28.1	71.9	13.6	86.4	67.5	32.5
高原气候区	60.6	39.4	27.3	72.7	60.6	39.4
亚热带气候区	22.6	77.4	11.3	88.7	68.7	31.3

3 结 论

本文以长江流域为研究对象, 基于过去 1960—2019 年的蒸发皿蒸发观测数据, 结合 PenPan 物理过程模型和最新发展的广义蒸发互补模型, 发现了长江流域蒸发皿蒸发和实际蒸散发在 1990 年前后均存在趋势反转的现象, 并对其时空变化规律进行归因分析。研究主要结论如下:

(1) 1960—2019 年, 长江流域年蒸发皿蒸发量总体呈现 0.21 mm/a 的下降趋势, 在 1990 年前后 2 个时段呈现趋势反转的现象。1960—1989 年的年蒸发皿蒸发量呈现 3.36 mm/a 的显著下降趋势, 主要分布在亚热带气候区; 1990—2019 年的年蒸发皿蒸发量呈 2.89 mm/a 的上升趋势。

(2) 风速和辐射下降是长江流域蒸发皿蒸发下降趋势的主导因素, 气温升高和相对湿度降低是上升趋势的主要因素。1960—1989 年高原气候区气温和辐射是蒸发皿蒸发变化的主导因子, 分别贡献 40.3% 和 47.8%; 亚热带气候区风速和辐射是蒸发皿蒸发下降趋势的主导因子, 分别贡献 49.1% 和 42.4%, 气温和相对湿度影响较小。1990—2019 年气温升高和相对湿度下降是蒸发皿蒸发上升趋势的主导因子, 相对贡献度高达 80% 以上, 而风速贡献很小。

(3) 1960—2019 年长江流域实际蒸散发总体呈现下降趋势, 在 1990 年前后 2 个时段也存在趋势反转的现象。1960—2019 年的年实际蒸散发量下降速率约为 0.63 mm/a, 其中 1990 年前呈 2.42 mm/a 的下降趋势, 1990 年后有 0.21 mm/a 的上升趋势。

参考文献:

- [1] 王卫光, 李进兴, 魏建德, 等. 基于蒸散发数据同化的径流过程模拟[J]. 水科学进展, 2018, 29(2): 159-168. (WANG W G, LI J X, WEI J D, et al. Runoff simulation by hydrological model based on the assimilated evapotranspiration[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(2): 159-168. (in Chinese))
- [2] KOPPA A, RAINS D, HULSMAN P, et al. A deep learning-based hybrid model of global terrestrial evaporation[J]. Nature Communications, 2022, 13: 1912.

- [3] PETERSON T C, GOLUBEV V S, GROISMAN P Y. Evaporation losing its strength[J]. *Nature*, 1995, 377(6551): 687-688.
- [4] UKKOLA A M, RODERICK M L, BARKER A, et al. Exploring the stationarity of Australian temperature, precipitation and pan evaporation records over the last century[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(12): 124035.
- [5] SHEN J, YANG H, LI S, et al. Revisiting the pan evaporation trend in China during 1988—2017[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, 127(12): e2022JD036489.
- [6] 聂宁, 张万昌, 陈豪, 等. 长江流域水储量变化的时间变化特征及归因分析[J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 396-407. (NIE N, ZHANG W C, CHEN H, et al. Temporal variation characteristics and attribution analysis of terrestrial water storage change in the Yangtze River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 396-407. (in Chinese))
- [7] RUIZ-ALVAREZ O, SINGH V P, ENCISO-MEDINA J, et al. Spatio-temporal trends in monthly pan evaporation in Aguascalientes, Mexico[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 136(1/2): 775-789.
- [8] 朱晓华, 徐芳, 姬祥祥, 等. 基于 PenPan 模型中国蒸发皿蒸发量的时空变化及成因分析[J]. *节水灌溉*, 2019(7): 87-94, 100. (ZHU X H, XU F, JI X X, et al. Spatiotemporal variation and causes of pan evaporation in China based on PenPan model[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(7): 87-94, 100. (in Chinese))
- [9] RODERICK M L, FARQUHAR G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. *Science*, 2002, 298(5597): 1410-1411.
- [10] WANG T T, ZHANG J, SUN F B, et al. Pan evaporation paradox and evaporative demand from the past to the future over China: a review[J]. *WIREs Water*, 2017, 4(3): e1207.
- [11] 王艳君, 姜彤, 许崇育. 长江流域 20 cm 蒸发皿蒸发量的时空变化[J]. *水科学进展*, 2006, 17(6): 830-833. (WANG Y J, JIANG T, XU C Y. Spatial-temporal change of 20 cm pan evaporation over the Yangtze River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(6): 830-833. (in Chinese))
- [12] 王艳君, 姜彤, 许崇育. 长江流域蒸发皿蒸发量及影响因素变化趋势[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(6): 864-870. (WANG Y J, JIANG T, XU C Y. Observed trends of pan evaporation and its impact factors over the Yangtze River basin between 1961 and 2000[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(6): 864-870. (in Chinese))
- [13] 宋萌勃, 陈吉琴, 张晓健, 等. 长江流域 1951—2000 年蒸发皿蒸发量变化趋势[J]. *水资源保护*, 2011, 27(1): 24-27, 33. (SONG M B, CHEN J Q, ZHANG X J, et al. Pan evaporation trend in Yangtze River basin from 1951 to 2000[J]. *Water Resources Protection*, 2011, 27(1): 24-27, 33. (in Chinese))
- [14] WANG K W, LIU X M, LI Y Q, et al. Deriving a long-term pan evaporation reanalysis dataset for two Chinese pan types[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124162.
- [15] ROTSTAYN L D, RODERICK M L, FARQUHAR G D. A simple pan-evaporation model for analysis of climate simulations: evaluation over Australia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(17): L17715.
- [16] BRUTSAERT W, PARLANGE M. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox[J]. *Nature*, 1998, 396: 30.
- [17] HAN S J, TIAN F Q. A review of the complementary principle of evaporation: from the original linear relationship to generalized nonlinear functions[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(5): 2269-2285.
- [18] BRUTSAERT W, CHENG L, ZHANG L. Spatial distribution of global landscape evaporation in the early twenty-first century by means of a generalized complementary approach[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2020, 21(2): 287-298.
- [19] YANG H B, YANG D W. Climatic factors influencing changing pan evaporation across China from 1961 to 2001[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 414/415: 184-193.
- [20] ALLEN R, PEREIRA L, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56[J]. FAO, 1998, 300(9): D5109.
- [21] RODERICK M L, ROTSTAYN L D, FARQUHAR G D, et al. On the attribution of changing pan evaporation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(17): L17403.
- [22] ZHANG J, SUN F B, XU J J, et al. Dependence of trends in and sensitivity of drought over China (1961—2013) on potential evaporation model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(1): 206-213.
- [23] BOUCHET R J. Actual and potential evapotranspiration, climatic significance[J]. *IAHS Publications*, 1963, 62: 134-142.
- [24] 王婷婷, 孙福宝, 章杰, 等. 基于析因数数值实验方法的蒸发皿蒸发归因研究[J]. *地理学报*, 2018, 73(11): 2064-2074. (WANG T T, SUN F B, ZHANG J, et al. A new method to attribute changes of pan evaporation: the experimental detrending

- approach[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2064-2074. (in Chinese))
- [25] LIU X M, LUO Y Z, ZHANG D, et al. Recent changes in pan-evaporation dynamics in China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(13): L13404.
- [26] ZENG Z Z, ZIEGLER A D, SEARCHINGER T, et al. A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(12): 979-985.
- [27] 鲁汉, 叶林媛, 罗鹏, 等. 基于遥感和再分析蒸散发数据的长江流域水循环变化时空特征研究[J]. *中国农村水利水电*, 2020(11): 42-49, 61. (LU H, YE L Y, LUO P, et al. Spatio-temporal characteristics of water cycle change in the Yangtze River basin based on remote sensing and reanalysis evapotranspiration data[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(11): 42-49, 61. (in Chinese))
- [28] 王艳君, 姜彤, 刘波. 长江流域实际蒸发量的变化趋势[J]. *地理学报*, 2010, 65(9): 1079-1088. (WANG Y J, JIANG T, LIU B. Trends of estimated and simulated actual evapotranspiration in the Yangtze River basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1079-1088. (in Chinese))
- [29] LI X Y, HE Y, ZENG Z Z, et al. Spatiotemporal pattern of terrestrial evapotranspiration in China during the past thirty years [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 259: 131-140.

Changes in pan evaporation and actual evapotranspiration of the Yangtze River basin during 1960—2019*

YE Linyuan^{1,2}, LU Han³, QIN Shujing^{1,2}, ZHANG Lu^{1,2}, XIONG Lihua^{1,2}, LIU Pan^{1,2}, XIA Jun^{1,2}, CHENG Lei^{1,2}

(1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;*

2. *Hubei Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction(Wuhan University), Wuhan 430072, China;*

3. *PowerChina Hubei Electric Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China)*

Abstract: As the link between energy balance and water cycle, changes in evaporation are of critical importance for regional hydrological cycle and water resources management of the Yangtze River basin (YZRB). In this study, the spatio-temporal characteristics and driving mechanisms of the long-term changes in pan evaporation (E_{pan}) of the YZRB from 1960 to 2019 were investigated using the PenPan model, and changes in actual evapotranspiration (E_a) were further evaluated using the latest generalized complementary relationship of evaporation. Results show that: ① Both E_{pan} and E_a of the whole YZRB decreased and then increased before and after 1990. The decreases of wind speed and net radiation were the main drivers for decreasing trend of E_{pan} before 1990, but the rise of temperature and decrease of relative humidity were the main drivers for increasing trend of E_{pan} after 1990. ② Trends of pan evaporation in both major climatic regions of YZRB (i. e., plateau climatic region and subtropical climatic region) were reversed before and after 1990 and were driven by different mechanisms. During 1960—1989, E_{pan} decrease in the plateau climatic region was driven by changes in temperature and radiation, while E_{pan} decrease in subtropical climatic region was driven by changes in wind speed and radiation. ③ During 1990—2019, E_{pan} increase in the plateau climatic region was mainly driven by the rising temperature, increased wind speed and decreased relative humidity, while E_{pan} increase in the subtropical climatic region was largely driven by the rising temperature and decreased relative humidity. This study can provide as a reference for the water cycle change detection and water resources allocation in the YZRB.

Key words: pan evaporation; actual evapotranspiration; complementary relationship of evaporation; attribution analysis; Yangtze River basin

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41890822; No.51879193).