

嘉陵江流域参考蒸散的年际变化趋势及成因分析

吕明权¹, 张磊², 吴胜军¹

(1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 2. 重庆渝佳环境影响评价有限公司, 重庆 400042)

摘要: 利用嘉陵江流域 1960—2013 年逐日气象数据, 计算该流域参考蒸散(ET_0), 应用 Mann-Kendal 方法及突变方法检测 ET_0 的变化趋势及突变点, 应用偏导系数法揭示了 ET_0 变化原因。结果表明: (1) 在 1960—2013 年, 嘉陵江流域平均 ET_0 减小, 减小斜率是 0.43 mm/a 。 ET_0 的年际变化较为剧烈, 整个流域平均 ET_0 在 1960—2013 年间经历了高一低一高的 3 个变化阶段。在 1981 年 ET_0 的变化趋势发生了突变, 嘉陵江流域 ET_0 的变化过程(1960—2013 年)可以分为 2 个阶段, 1960—1981 年流域的整体 ET_0 均值变化波动较小(0.44 mm/a), 1982—2013 年增加趋势明显(2.62 mm/a)。不同时间尺度统计, 流域北部均属于 ET_0 增加区域; (2) “蒸发悖论”现象存在时空差异, 从整个研究时段看, 流域整体存在“蒸发悖论”现象, 1981 年前后两个时段分别统计, 存在“蒸发悖论”现象的气象站和区域较少; (3) 1960—1981 年引起嘉陵江流域 ET_0 变化的主导因子是风速和太阳辐射, 1982 年后由于气候变暖趋势明显, 温度上升对整个流域的 ET_0 增加发挥着主导作用。

关键词: 参考蒸散; 成因分析; 主导因子; 突变; 嘉陵江流域

中图分类号: P426.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)03-0077-09

Interannual Change and Attribution of Reference Evapotranspiration over Jialingjiang Basin

LYU Mingquan¹, ZHANG Lei², WU Shengjun¹

(1. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences,

Chongqing 400714, China; 2. Chongqing Yujia Environmental Impact Assessment Co., Ltd. Chongqing 400042, China)

Abstract: As a dominant consumer for solar radiation, evapotranspiration is a primary link for the surface energy balance and component of hydrologic cycle. In recent years, the new dynamics regarding reference evapotranspiration (ET_0) have been detected in some regions in the world. However, whether a new dynamics of ET_0 exist in Jialingjiang River Basin was not available in the literature. In addition, quantitative attribution of changes in ET_0 to key climatic factors was also not available in the literature. Temporal patterns in ET_0 and related driving factors over Jialingjiang Basin were investigated in the period 1960—2013 based on daily data from 30 standard meteorological stations. The non-parametric Mann-Kendal method was used to detect trend of mean annual ET_0 . Some change-point year detection including Pittett, moving T test and Cumulative Sum algorithm, were applied to identify abrupt year. For the purpose of ET_0 spatialization, Kringing interpolation method also was utilized. The results showed that: (1) the mean ET_0 reduced at the rate of 0.43 mm/year , and the mean ET_0 went through high-low-high phases; the mean ET_0 changed abruptly around 1981, the mean ET_0 slightly increasing by 0.4 mm/year between 1960—1981, while an obvious increasing trend at 2.62 mm/year appeared between 1982—2013; (2) ‘evaporation paradox’ phenomenon was characterized by spatial and temporal disparities, ‘evaporation paradox’ phenomenon could be detected in the period 1960—2013 when comparing the mean ET_0 and air temperature trends; however, with respect to the period 1960—1981 and 1982—2013, the areas where ‘Evaporation paradox’ phenomenon could be detected were small; (3) in the period from 1960 to 1981, wind speed and solar radiation were the leading climatic variables to change ET_0 ; During 1982—2013, air tempera-

ture was the dominant factor to increase ET_0 because of climate warming.

Keywords: reference evapotranspiration; attribution analysis; dominant factor; abrupt change; Jialingjiang Basin

全球陆地表面多年平均蒸散量约占降水量的 58%~65%,相应的陆地表面平均潜热通量(λE)约是净辐射通量的 51%~58%,这表明蒸散是联系水循环和能量循环的关键环节^[1]。蒸散是确定作物需水量估计^[2-3]、农田灌溉^[4]、生态过程分析^[5]、干旱评估^[6-8]的基础,不仅如此,蒸散影响地面热量和水分状况,进而决定着地表生态环境的形成和演变^[9]。因此,陆面蒸散发的研究一直是国内外地学水文学的焦点问题之一。由于土地—植被—大气系统组分的复杂相互作用,导致蒸散发可能是所有水文循环组成中最难估算的一个部分。参考蒸散(ET_0),它表示在一定气象条件下水分供应不受限制时,某一固定下垫面可能达到的最大蒸发蒸腾量,是非常理想的陆面蒸散发能力的表征指标,在学术界已经发展了较为成熟的计算方法,因此,有关参考蒸散的研究非常广泛。

过去 50 a,地球表面的温度平均每 10 a 上升 0.13^[10],全球变暖已经成为不争的事实。人们普遍认为全球变暖可能会使大气变干,在预测气候变化和水文模拟时,一般都会得出蒸发增加的结论。但是,在 2000 年前,全球很多区域发现蒸发皿蒸发或 ET_0 是随着温度的增加呈现减少趋势^[11]。全球气温上升而蒸发(参考蒸散)减少的水文气象现象称之为“蒸发悖论”^[12-13],目前“蒸发悖论”问题已经成为蒸发及蒸散研究中的热点问题。在中国的黄河流域^[14-15]、海河流域^[16-17]、长江流域^[18-19]、青藏高原^[20-21]的蒸发或蒸散有“蒸发悖论”现象。“蒸发悖论”现象的解释主要是其他气象要素的变化引起蒸发的减小量抵消了由于温度升高引起蒸散的增加量,因此导致蒸散随着温度增加而减小的现象^[22-23]。有研究发现,引起蒸散减小的气象要素主要是风速^[24]和太阳辐射(全球变暖)^[25]。由于气候变化的效应和蒸散本身变化的波动周期性,随着气象数据序列的增加,蒸散由减少趋势开始向增加趋势的转变现象发生^[26-28]。在中国,这种趋势转变和太阳辐射增加(由全球变暖向全球变亮),变暖趋势增强有关联^[22]。

嘉陵江流域是长江流域的主要组成部分,有关长江流域的蒸散研究较多^[18-19,29-31],如 XU 等^[18]用截至 2000 年的数据分析认为长江流域整体 ET_0 变化趋势减小,主要原因是太阳辐射和风速的减少。但这些研究注重整体,对子流域关注较少,子流域的 ET_0 变化规律是否和长江流域的变化趋势一致我们还不得而知,流域是否有“蒸发悖论”现象?参考蒸散变化驱动

要素是什么,引起参考蒸散变化主导因子是什么,这些问题我们依然不清楚。本文利用长江流域的子流域嘉陵江流域为研究对象,本文利用嘉陵江流域及附近的 30 个气象站 1960—2013 年的逐日观测气象资料计算参考蒸散量,分析流域参考蒸散的年际变化,使用偏导系数法量化参考蒸散变化的因子贡献,以期回答上述问题。希望结果可以理解该区域的蒸散变化规律,为该区域的水文循环研究提供借鉴。

1 研究方法

1.1 参考作物蒸散量(ET_0)

本文采用联合国粮农组织(FAO)1998 年修订的 Penman-Monteith 模型计算潜在蒸散量 ET_0 ,FAO 将参考作物蒸散量(ET_0)定义为一假想的参照作物冠层的蒸散速率,即假设作物高度为 0.12 m、叶片阻力为 70 s/m,反射率为 0.23 时,表面开阔、高度一致、生长旺盛、完全覆盖地面、水分供应充分的绿色草地的蒸散量,该模型综合了空气动力学的湍流传输与能量平衡,并在世界各国得到了广泛应用,其计算公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

式中: ET_0 为参考作物蒸散量(mm/d); Δ 为饱和水汽压—温度曲线斜率(kPa/°C); R_n 为作物表面的净辐射(MJ/(m²·d)); G 为土壤热通量(MJ/(m²·d)),当计算的时间尺度长于半个月时,可忽略为 0; T 为空气平均温度(°C); γ 为干湿表常数(kPa/°C); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); $e_s - e_a$ 表示水汽压亏缺; U_2 为 2 m 处的风速(m/s),我国气象站记录的风速是 10 m 的风速,根据公式转化。

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha)(a_s + b_s \frac{n}{N})R_a$$

$$R_{nl} = \sigma(\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2})(0.56 - 0.25\sqrt{e_a})(0.1 + 0.9 \frac{n}{N})$$

式中: R_{ns} 为净短波辐射; R_{nl} 为净长波辐射; R_l 为晴天辐射;MJ/m²; a_s 为云遮盖下($n=0$)大气外界辐射到达地面的分量; b_s 为晴天($n=N$)大气外界辐射到达地面的分量; a_s 和 b_s 的系数根据参考文献[32]确定; α 为地表反射度,取值 0.23。 σ 为 Stefan-Boltzmann 常数(4.903×10^{-8} MJ/(K⁴·m²·d)); $T_{\max,K}$ 和 $T_{\min,K}$ 分别为绝对温标的最高、最低温度(K); n 为实际日照时数(h); N 为可照时数(h)。

1.2 参考作物蒸散量变化的因子贡献分析

根据 ET_0 的定义, ET_0 是固定下地面和供水条件只受太阳辐射、气温、风速等气象条件影响的变量, 因此要寻找参考蒸散量变化原因可先寻找这些气象要素怎么影响参考蒸散量。敏感性分析尽管能够定量反映 ET_0 变化对气象因子变化的响应, 但并不能完全确定各气候因子变化对于 ET_0 变化的实际贡献水平^[33-35], 因为 ET_0 的变化不仅受其气候敏感性的影响, 同时还与各气候因子的变化程度有关。Roderick^[36] 和 Donohue^[37] 通过计算各气象因子的年变化速率和偏导数成功确定各因子对蒸发变化的影响大小, 该方法也应用在其他区域都取得不错的效果^[38-39]。

本研究主要考虑温度、太阳辐射、风速和实际水汽压四项气象要素对 ET_0 的变化率的贡献, 考虑到还要其他因素对 ET_0 的变化有影响, 因此, ET_0 的变化率有如下的等式:

$$\frac{dET_0}{dt} = \frac{\partial ET_0}{\partial T_a} \frac{dT_a}{dt} + \frac{\partial ET_0}{\partial U} \frac{dU}{dt} + \frac{\partial ET_0}{\partial R_n} \frac{dR_n}{dt} + \frac{\partial ET_0}{\partial e_a} \frac{de_a}{dt} + \epsilon = C(T_a) + C(U) + C(R_n) + C(e_a) + \epsilon$$

$$C(T_a) = \frac{\gamma U_2 (e_s - e_a) \frac{900}{T_a + 273} \frac{d\Delta}{dt} \frac{dT_a}{dt}}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)]^2} +$$

$$\frac{\gamma U_2 \frac{900}{T_a + 273} \frac{de_s}{dt} \frac{dT_a}{dt}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} + \frac{0.408(1 + 0.34)U_2 R_n \gamma \frac{d\Delta}{dt} \frac{dT_a}{dt}}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)]^2}$$

$$C(U) = -\frac{0.139R_n \gamma \Delta}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)]^2} \frac{dU_2}{dt} +$$

$$\frac{\gamma(\Delta + \gamma)(e_s - e_a) \frac{900}{T_a + 273} \frac{dU_2}{dt}}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)]^2}$$

$$C(R_n) = \frac{0.408\Delta}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \frac{dR_n}{dt}$$

$$C(e_a) = -\frac{\gamma U_2 \frac{900}{T_a + 273} \frac{de_a}{dt}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

将温度、太阳辐射、风速和实际水汽压四项气象要素对 ET_0 变化的贡献度求和:

$$C(ET_0) = C(T_a) + C(U) + C(R_n) + C(e_a)$$

为了确定这 4 个气象因子来解释 ET_0 变化的合理性, 用 ET_0 本身的变化 ($\frac{dET_0}{dt}$) 和 $C(ET_0)$ 进行回归分析。

1.3 统计分析方法

本文用两种方法来确定 ET_0 及各气象要素的趋势大小: 一是线性回归法; 二是 Sen 趋势估计法。流

域的整体变化趋势用线性回归法确定, 各气象站点的变化趋势用 Sen 趋势估计确定。非参数化 Sen 方法可通过 Mann-Kendall 统计检验方法对变化趋势及显著性水平进行检测, M-K 统计检验方法是一种非参数统计检验方法, 其优点是不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 具有检验范围宽、定量化程度高、人为性小等优点, 因而被广泛用于水文和气象要素的趋势检验研究。Sen^[40] 估计值:

$$\text{Sen} = \text{Median} \left\{ \frac{x_i - x_j}{i - j} \right\}$$

本文用 3 种方法确定 ET_0 变化序列的突变点, 分别是滑动 T 检验法 (MTT)、Pettitt 法和累积距平法 (CUSUM)。

本文用反距离加权法 (IDW) 对 ET_0 的变化率和各个因子的贡献值进行空间插值, IDW 在气象要素空间化表达中已被多次的应用^[29, 41-42]。

2 研究区域与数据来源

2.1 研究区域

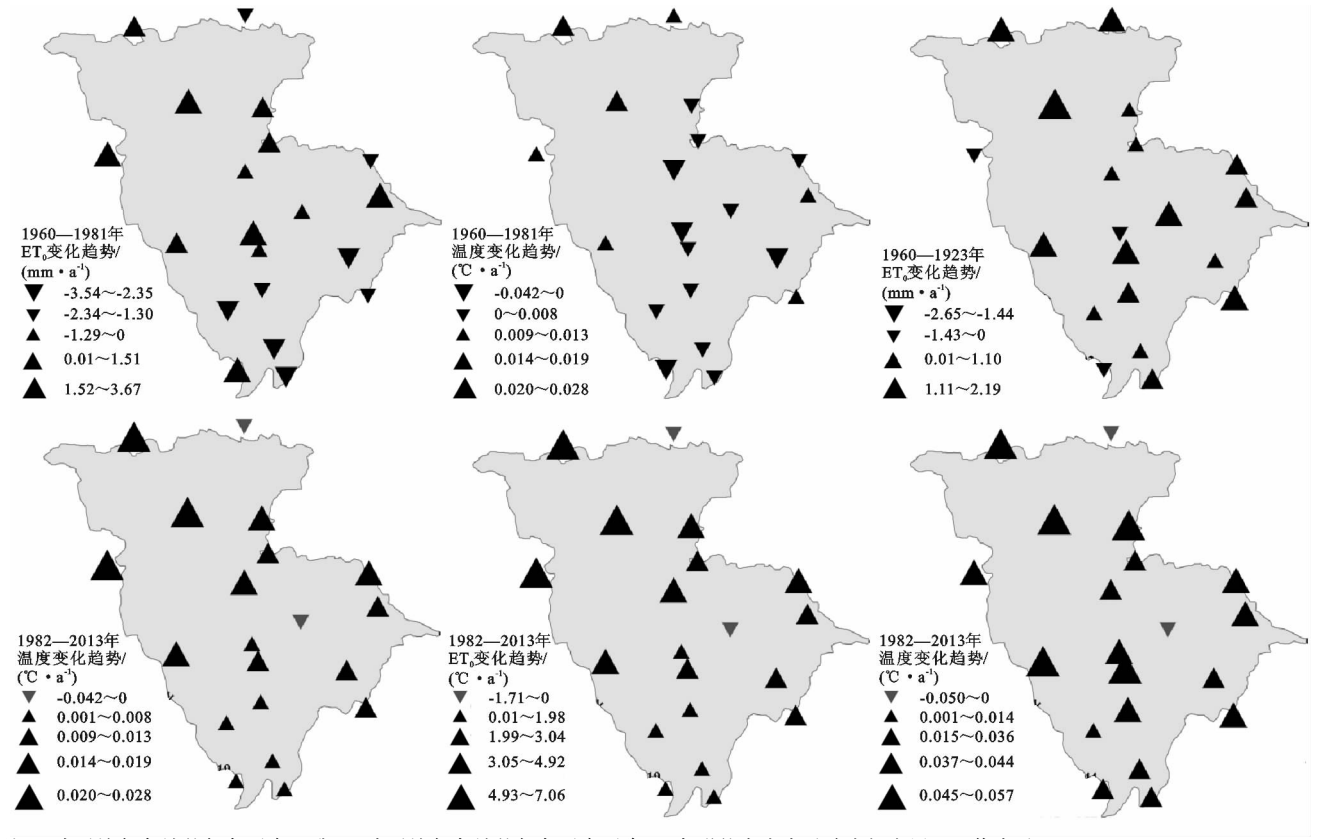
嘉陵江流域位于东经 $102^{\circ}33' - 109^{\circ}00'$, 北纬 $29^{\circ}40' - 34^{\circ}30'$, 流域面积 16 万 km^2 , 全长 1 280 km, 是长江北岸主要支流之一, 也是三峡水库集水面积最大的一级支流。东北以秦岭、大巴山与汉水为界, 东南以华蓥山与长江相隔, 西北有龙门山与岷江接壤, 西及西南有一低矮的分水岭与沱江毗连。嘉陵江流域为亚热带季风气候, 降雨季节分配极不均匀, 夏秋多雨, 冬春少雨, 5—9 月雨量占全年雨量的 70%~90%。流域位于亚热带范围内, 平均气温 $16 \sim 18^{\circ}\text{C}$ 。冬春受西北风带环流、内陆气流影响而少雨, 夏秋受副热带南方海洋暖湿气流影响而多雨。在中下段的盆地地区, 冬季温暖多雾, 霜雪少见, 上游山区则冬季寒冷, 霜雪较多。流域内年均气温 10°C 左右, 降水量在 1 000 mm 以上, 其中 50% 的年降水量集中在 7—9 月。

2.2 数据来源

参考蒸散计算需要逐日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), 最高气温 ($^{\circ}\text{C}$), 最低气温 ($^{\circ}\text{C}$), 10 m 高处风速 (m/s), 日照时数 (h) 和相对湿度 (%) 等气象数据, 逐日常规气象资料来自于中国气象局国家气象信息中心 (<http://www.nmic.gov.cn/>)。嘉陵江流域内共有 13 个气象站, 流域北部区域气象站分布稀少, 而一些气象站离嘉陵江流域非常近, 流域周围气象站 17 个, 为了使蒸散的变化格局进行空间化表达, 将周围 17 个站的计算结果纳入空间插值分析中。将气象站分布稀少区域周围 7 个气象站纳入嘉陵江流域蒸散变化的站点统计分析, 嘉陵江流域蒸散的站点考虑的气象站共

变暖趋势明显,从气温变化的空间分布来看只有巴中站附近区域呈减小趋势(图 3)。变暖过程中,前 21 a 气温并没有增加,整个流域气温平均每 10 a 以 0.05℃的速率减小,有 7 个站的气温呈增加趋势,其余 13 个站的气温

减小,减小的区域主要分布在流域的中南部(图 3);后 33 a 气温增幅明显(以每 10 a 增加 0.52℃的速率),只有巴中站附近区域的气温减小,其他区域的气温明显上升,14 个站的气温均呈显著增加(图 3)。



注:▲表示该气象站的气象要素上升,▼表示该气象站的气象要素下降,三角形的大小表示减小幅度用 Sen 值表示。

图 3 嘉陵江流域 ET₀ 及温度的变化

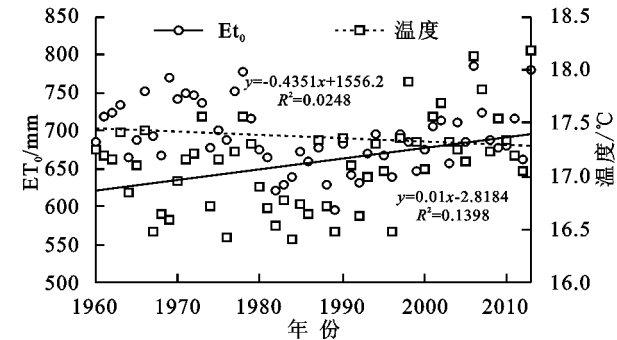


图 4 嘉陵江流域 1960—2013 年 ET₀ 和温度变化

如果简单的对比流域的蒸散平均值的变化(−4.35 mm/10 a)和温度的年际变化(0.1℃/10 a),流域存在“蒸发悖论”现象。但是,局部区域和与全流域整体形式并不完全同步(图 3)。将各气象站的温度和蒸散年际变化插值,对比温度和蒸散的变化趋势从而更为精确分析“蒸发悖论”现象。整个研究时段,共有 13 个气象站的蒸散减小,其中有 12 个气象站的温度上升,在这 12 个气象站上存在“蒸发悖论”现象;另外 7 个气象站的温度和 ET₀ 的变化方向同步,除了巴中站以外均呈上升趋势的,不存在“蒸发悖论”现象。从空间分布来

看,“蒸发悖论”现象主要发生在流域的南部。

分时段研究,存在“蒸发悖论”现象的气象站和区域较少。1960—1981 年,流域气温的总体趋势是减小的,在气温上升的气象站中,只有广元和麦基站的蒸散减小存在“蒸发悖论”现象,但是从空间分布来看蒸散减小的区域非常小。1981 年后,气候变暖现象非常明显,19 个气温明显上升的气象站中有 3 个站(松潘、大足和阆中)的 ET₀ 减小,这 3 个站存在“蒸发悖论”现象。巴中站的气温减小,但蒸散却显著增加。据以上分析可知,从 1981 年为分割点的前后研究时段,存在“蒸发悖论现象”的气象站和区域均较少,在 1960—1981 年,只在广元和麦基站附近存在该现象,其他区域观察不到该现象。而在后 32 a,变暖趋势明显,只有 3 个站(松潘、大足和阆中)附近区域有“蒸发悖论”现象存在。

3.3 蒸散变化的归因分析

蒸散量受各种因素综合影响,主要有气温、风速、日照时数、相对湿度、饱和水汽压差等气象要素,由于影响潜在蒸发量变化的因素众多,不同因素之间也相互影响,所以潜在蒸发量的变化成因十分复杂。用偏

导系数法将 30 个气象站的气温、风速、太阳辐射和实际水汽压对蒸散变化的影响计算出来,用 IDW 方法将计算结果插值(图 5),但在统计分析中只考虑流域的 20 个气象站。

将 4 个气象因子的作用相加后,得到这 4 个气象因子引起 ET_0 变化的总贡献值 $C(ET_0)$,将 2 个时段(1960—1981 年,1982—2013 年)30 个气象站点的

$C(ET_0)$ 和相应时段 ET_0 年际变化量($\frac{dET_0}{dt}$)回归分析,这些点均分布在 1:1 线附近,且 R^2 系数高达 0.99(图 6),这 4 个气象因子引起的 ET_0 变化量之和与 ET_0 的年际变化量非常接近。该结果表明这 4 个气象因子来解释嘉陵江流域的参考作物蒸散变化的原因是可行的。

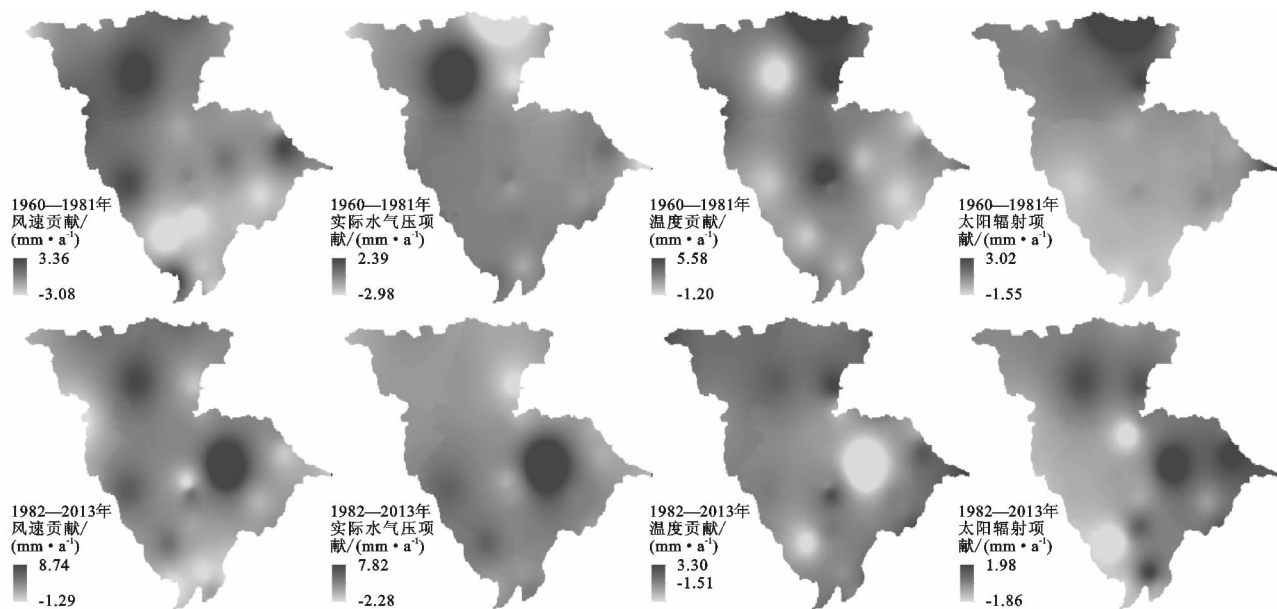


图 5 气象要素对 ET_0 年际变化的贡献空间分布

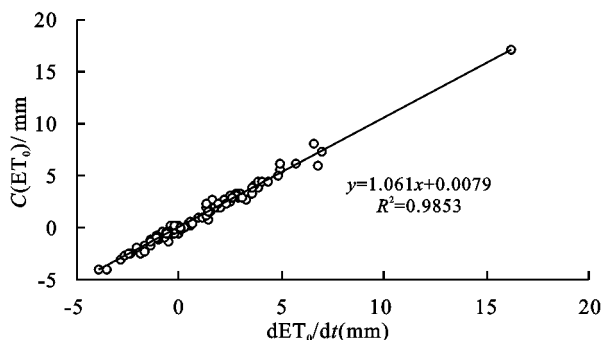


图 6 $C(ET_0)$ 和 ET_0 年际变化量的关系

从温度对蒸散变化贡献的空间分布图看出(图 5),1960—1981 年,在嘉陵江流域北部,温度对 ET_0 年际变化贡献为正,在中部和南部温度贡献为负。从气象站来统计,有 7 个气象站的温度对 ET_0 的变化呈正贡献,其中麦基站的温度对 ET_0 的贡献高达 6.08 mm/a,在其他的 13 个气象站上,温度使蒸散减小。1982—2013 年,嘉陵江流域温度对 ET_0 的影响较为一致,较之 1960—1981 时段,温度对流域蒸散的正贡献区域明显增加,除了巴中站(-1.52 mm/a)以外,其他 19 个气象站的温度均对 ET_0 年际变化的贡献为正,贡献大小从 0.71 mm/a 到 3.08 mm/a,表明在这个时段温度的上升对 ET_0 的增加影响较大。

1960—1981 年,风速对 ET_0 贡献的影响空间分

异较为明显(图 5),有 11 个站点区域的风速增加对 ET_0 变化是正贡献,贡献大小从 0.24 mm/a 到 3.37 mm/a,且这些站点主要分布在流域的北部,在流域南部风速减小使 ET_0 减小。1982—2013 年,风速呈现正贡献的站点增加到 14 个,其中巴中站因风速增加对 ET_0 的贡献达 8.75 mm/a,从风速对 ET_0 的贡献大小分布来看,这个时段风速对 ET_0 的年际变化呈负贡献的区域明显减小。

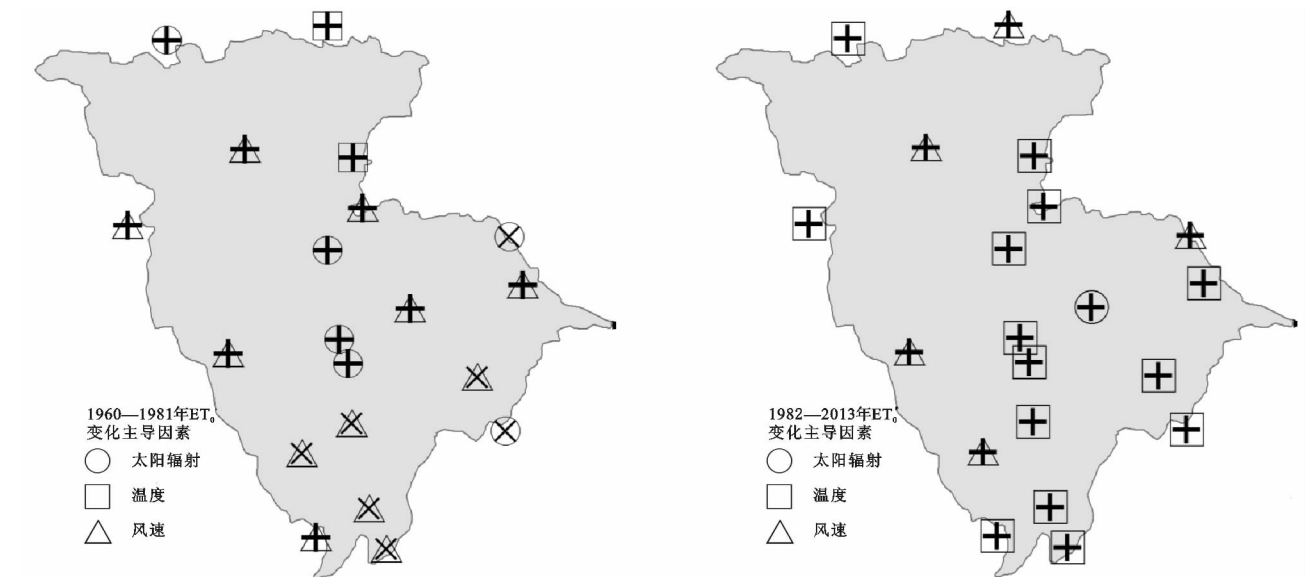
1960—1981 年,9 个气象站点由于太阳辐射减小对 ET_0 的年际变化是负贡献,其贡献范围 -0.31 ~ -1.56 mm/a,1982—2013 年,有 10 个站点因太阳辐射减少对 ET_0 的年际变化是负贡献,从太阳辐射的空间分布图看出,正负贡献范围面积变化不大,但是空间格局从 1960—1981 年的南北格局变为 1982—2013 年的东西格局(图 5)。

在 1981 年前,在流域有大部分区域因实际水汽压减小而使得 ET_0 增加,负贡献的区域主要在流域的东部。1981 年后,水汽压负贡献的区域明显扩大,正负贡献区分别分布在南北区域(图 5)。

根据 4 个气象因子对 ET_0 的贡献的大小,决定不同气象站上引起 ET_0 变化的主导因子。1960—1981 年,有 12 个气象站引起 ET_0 变化的主要因素是风速的变化,

有6个气象站引起 ET_0 的变化,主要气象因子是太阳辐射的增加,其中3个站点位于流域中部,引起略阳和麦积站 ET_0 变化的主导因子是温度的增加(图7)。从整个流域来看,控制这个时段变化的主导气象因子是风速,但是风速引起 ET_0 变化的方向上不同,在流域南部的5个气象站上风速使 ET_0 减少。用2000年前的气象数据为基础的研究认为蒸散减少主要原因是风速和太阳辐射的减少,如XU等^[19]研究认为长江流域蒸散减小的主要归因于风速和太阳辐射。嘉陵江流域的20个气象

站中,有18个气象站的主导因素的确是风速和太阳辐射,但其中只有6个气象站的风速和太阳辐射使蒸散减少,其他12个气象站中这两气象要素使 ET_0 增加的。1982—2013年,引起嘉陵江流域 ET_0 增加的主导气象因子是温度,在20个气象站中,共有14个气象站的主导因子是温度的上升,麦积、镇巴、武都、绵阳和遂宁站 ET_0 增加过程中贡献最大的是风速增强,这些气象站分布在流域的西部,而巴中在这个时段 ET_0 的增加则归因于实际水汽压的变化(图7)。



注: +代表主导因素使 ET_0 增加, -代表主导因素使 ET_0 减小

图7 ET_0 变化的主导因素

4 结论

(1) 1960—2013年,流域 ET_0 趋势减小,减小速率 0.44 mm/a ,整个流域平均 ET_0 变化较为剧烈,在1960—2013年间经历了高一低一高的3个变化阶段,在前20a的 ET_0 均值 720 mm ,1980—2000年 ET_0 均值是 680 mm ,2000—2013年 ET_0 均值上升到 720 mm 。在1981年检测到流域的 ET_0 的变化存在突变,可以认为嘉陵江流域 ET_0 的演变过程(1960—2013)可以分为2个阶段,1981年前 ET_0 稳定在 720 mm/a 附近,1981年 ET_0 突然降小后开始增加。

(2) 1960—2013年,流域 ET_0 减小的区域比增加的面积大, ET_0 增加的区域主要分布在嘉陵江流域的西北部。不同时间尺度统计,流域北部均属于 ET_0 增加区域。1960—1981年,流域的整体 ET_0 均值微弱增加(0.4 mm/a),增加区域面积比减小的面积大,且主要分布在中部和北部。1982—2013年,增加趋势特别明显(2.62 mm/a),除阆中、松潘和大足站附近小块区域以外的其他区域 ET_0 均呈现增加趋势。

(3) “蒸发悖论”现象存在时空差异。从整个研究时段看,流域整体存在“蒸发悖论”现象,按气象站统计,有12个气象站上存在“蒸发悖论”现象且主要分布在流域南部。1981年前后两个时段分别统计,存在“蒸发悖论”现象的气象站和区域较少。在1960—1981年,只在广元和麦基站附近存在该现象,而在后32a,只有3个站(松潘、大足和阆中)附近区域有“蒸发悖论”现象存在。

(4) 1960—1981年,引起嘉陵江流域 ET_0 变化的主导因子是风速和太阳辐射,但是引起 ET_0 变化的方向不一样,在南部主导因子作正贡献,而在中部和北部太阳辐射和风速增加发挥主导作用。1982年后,由于气候变暖趋势明显,温度上升对整个流域的 ET_0 增加发挥着主导作用。

参考文献:

- [1] Brutsaert W. Hydrology: An introduction[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [2] 赵娜娜,刘钰,蔡甲冰. 夏玉米作物系数计算与耗水量研究[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 953-959.

- [3] 吕明权,王继军.不同土地利用/覆盖情景下东北沟流域植被生态需水量及其对产流影响[J].自然资源学报,2012,27(2):243-253.
- [4] 顾世祥,何大明,崔远来,等.近50多年来澜沧江流域农业灌溉需水的时空变化[J].地理学报,2010,65(11):1355-1362.
- [5] Fisher J B, DeBiase T A, Qi Y, et al. Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada forest ecosystem[J]. Environ. Modell. Software, 2005,20(6):783-796.
- [6] Huo Z, Dai X, Feng S, et al. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China[J]. Journal of Hydrology, 2013,492(492):24-34.
- [7] Begueria S, Vicente-Serrano S M, Reig F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index(SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring[J]. International Journal of Climatology, 2014,34(10):3001-3023.
- [8] Liu X M, Zhang D, Luo Y Z, et al. Spatial and temporal changes in aridity index in northwest China:1960 to 2010[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2013,112(1/2):307-316.
- [9] 谢平,陈晓宏,王兆礼,等.东江流域实际蒸发量与蒸发皿蒸发量的对比分析[J].地理学报,2009,64(3):270-277.
- [10] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment[M]. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [11] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength[J]. Nature, 1995,377(6551):687-688.
- [12] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. Science, 2002,298(5597):1410-1411.
- [13] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox [J]. Nature, 1998, 396(6706):30-30.
- [14] Wang W, Shao Q, Peng S, et al. Reference evapotranspiration change and the causes across the Yellow River Basin during 1957—2008 and their spatial and seasonal differences[J]. Water Resources Research, 2012,48(5):113-122.
- [15] Ma X, Zhang M, Li Y, et al. Decreasing potential evapotranspiration in the Huanghe River Watershed in climate warming during 1960—2010 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2012,22(6):977-988.
- [16] Xing W, Wang W, Shao Q, et al. Changes of reference evapotranspiration in the Haihe River Basin: Present observations and future projection from climatic variables through multi-model ensemble[J]. Global and Planetary Change, 2014,115:1-15.
- [17] Wang W, Peng S, Yang T, et al. Spatial and temporal characteristics of reference evapotranspiration trends in the Haihe River Basin, China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2011,16(3):239-252.
- [18] Xu C Y, Gong L B, Jiang T, et al. Decreasing reference evapotranspiration in a warming climate—a case of Changjiang(Yangtze) River Catchment During 1970—2000[J]. Advance in Atmospheric Sciences, 2006,23(4):513-520.
- [19] Xu C Y, Gong L, Jiang T, et al. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang(Yangtze River) catchment[J]. Journal of Hydrology(Amsterdam), 2006,327(1/2):81-93.
- [20] Zhang X, Ren Y, Yin Z Y, et al. Spatial and temporal variation patterns of reference evapotranspiration across the Qinghai-Tibetan Plateau during 1971—2004 [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2009,114: D15105.
- [21] Xie H, Zhu X. Reference evapotranspiration trends and their sensitivity to climatic change on the Tibetan Plateau (1970—2009) [J]. Hydrological Processes, 2013,27(25):3685-3693.
- [22] Liu X, Zhang D. Trend analysis of reference evapotranspiration in northwest china: The roles of changing wind speed and surface air temperature[J]. Hydrological Processes, 2013,27(26):3941-3948.
- [23] Zhang D, Liu X. Assessing the effect of climate change on reference evapotranspiration in China[J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2013,27(8):1871-1881.
- [24] Mcvicar T R, Roderick M L, Donohue R J, et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation[J]. Journal of Hydrology, 2012,416(1):182-205.
- [25] Papaioannou G, Kitsara G, Athanasatos S. Impact of global dimming and brightening on reference evapotranspiration in Greece[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011,116: D09107.
- [26] Cong Z T, Yang D W. Does evaporation paradox exist in China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 13,3(2009-03-18),2009,13(4):357-366.

- [27] Palumbo A D, Vitale D, Campi P, et al. Time trend in reference evapotranspiration: analysis of a long series of agrometeorological measurements in Southern Italy [J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 2011, 25(4): 395-411.
- [28] Espadafor M, Lorite I J, Gavilán P, et al. An analysis of the tendency of reference evapotranspiration estimates and other climate variables during the last 45 years in Southern Spain[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6):1045-1061.
- [29] 王琼,张明军,潘淑坤,马雪宁. 长江流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(5):1292-1302.
- [30] Gong L, Xu C, Chen D, et al. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang(Yangtze River)basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 329(3):620-629.
- [31] 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.
- [32] Rensheng C, Shihua L, Ersi K, et al. Estimating daily global radiation using two types of revised models in China[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(7):865-878.
- [33] 梁丽乔,李丽娟,张丽,等. 松嫩平原西部生长季参考作物蒸散发的敏感性分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5):1-5.
- [34] 曾丽红,宋开山,张柏,等. 东北地区参考作物蒸散量对主要气象要素的敏感性分析[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(1):11-18.
- [35] 刘昌明,张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. *地理学报*, 2011, 66(5):579-588.
- [36] 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):251-270.
- [37] Donohue R J, Mcvicar T R, Roderick M L. Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate[J]. *Journal of Hydrology(Amsterdam)*, 2010, 386(1):186-197.
- [38] Tang B, Tong L, Kang S, et al. Impacts of climate variability on reference evapotranspiration over 58 years in the Haihe river basin of north China[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(10):1660-1670.
- [39] Yang H, Yang D. Climatic factors influencing changing pan evaporation across China from 1961 to 2001 [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 414(2):184-193.
- [40] Hirsch R M, Slack J R, Smith R A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data [J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(1):107-121.
- [41] Nam W H, Hong E M, Choi J Y. Has climate change already affected the spatial distribution and temporal trends of reference evapotranspiration in South Korea? [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 150:129-138.
- [42] Duhan D, Pandey A. Statistical analysis of long term spatial and temporal trends of precipitation during 1901—2002 at Madhya Pradesh, India [J]. *Atmospheric Research*, 2013, 122:136-149.

~~~~~

(上接第76页)

- [21] Quinn P, Beven K, Chevallier P, et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models[J]. *Hydrological Processes*, 1991, 5(1):59-79.
- [22] 杨勤科, Mcvicar T R, 李领涛, 等. ANUDEM-专业化数字高程模型插值算法及其特点[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(3):36-41.
- [23] 张彩霞, 杨勤科, 段建军. 高分辨率数字高程模型的构建方法[J]. *水利学报*, 2006, 37(8):1009-1014.
- [24] 张宏鸣, 杨勤科, 李锐, 等. 基于GIS和多流向算法的流域坡度与坡长估算[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(10):159-164.
- [25] 樊宇, 郭伟玲. 县南沟流域坡长尺度效应的ANUDEM研究[J]. *金属矿山*, 2017, 46(10):47-51
- [26] 刘红艳, 杨勤科, 王春梅, 等. 坡度随水平分辨率变化及其空间格局研究[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2012, 37(1):105-109.