

# 重庆市参考作物蒸散量及湿润指数变化研究

徐羽, 徐刚, 吴艳飞, 甘芬芳

(西南大学 地理科学学院, 重庆 400715)

**摘要:**利用1960—2008年重庆市34个气象站点的逐日降水、气温、气压、空气相对湿度、日照时数等气象要素资料,采用FAO推荐的彭曼—孟蒂斯公式,以日为单位,计算出各站点近49 a的参考作物蒸散量和湿润指数;采用线性趋势法、ArcGIS反距离权重空间插值法、Mann-Kendall突变检验法和相关分析法等方法,分析了1960—2008年重庆市的参考作物蒸散量和湿润指数的时空分布和变化趋势。结果表明:(1)重庆市年均参考作物蒸散量的空间分布差异显著,表现为由渝东南地区向渝东北地区、渝中地区增加的趋势。时间上,1960—2008年总体呈现下降趋势,但有阶段性的差异;(2)年均湿润指数空间分布差异较大,以渝东南的酉阳湿润指数最高,并由渝东南地区向渝东北地区、渝中地区递减。年均湿润指数时间分布总体呈现上升趋势,但阶段性有差异,突变年为1979年;(3)重庆市地表湿润指数与降水量、相对湿度呈现显著的正相关关系,与平均气温、最高气温、平均风速、日照时数以及参考作物蒸散量呈负相关。

**关键词:**Penman-Monteith法;参考作物蒸散量;湿润指数;Mann-Kendall突变检验;影响因素;重庆市

**中图分类号:**S161.4;P467

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2015)03-0176-06

## Reference Crop Evapotranspiration and Surface Humidity Index in Chongqing City

XU Yu, XU Gang, WU Yanfei, GAN Fenfang

(School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** Based on the climatic factors such as daily maximum temperature, minimum temperature, precipitation, relative humidity, wind speed and sunshine duration measured daily at 34 stations from 1960 to 2008 in Chongqing City, potential evaporation was calculated for the region using the United Nations Food and Agriculture Organization (FAO) Penman-Monteith model, which allows the calculation of the surface humidity index for the location of each station. The spatial and temporal distribution and change trend of reference crop evapotranspiration and wetness index in Chongqing City from 1960 to 2008 were analyzed by using the linear regression, inverse distance weighted methods in ArcGIS 10.0, Mann-Kendall mutation test, correlation analysis method. The results indicated that: (1) spatially, the reference crop evapotranspiration appeared as geographical difference obviously, which exhibited a gradual increased from southeast to northeast and mid-west of Chongqing City, and decreased timely, but was different with stages; (2) the spatial pattern of the change of humidity index of the study region showed clear difference in different regions, with the humidity index decreasing from southeast to southwest and northeast, and highest in Youyang station, the annual humidity index distributed a rising trend, and the mutation year is 1797, but different in stages; (3) the humidity index had the positive correlations with precipitation and relative humidity, but had the negative correlations with average temperature, maximum temperature, wind speed, sunshine duration and potential evaporation.

**Keywords:** Penman-Monteith model; potential evapotranspiration; humidity index; Mann-Kendall abrupt change inspection method; impacting factor; Chongqing City

蒸散(发)是地球表面水分和能量平衡的纽带。在区域蒸散和湿润指数的估算中,常选用参考作物蒸散量。参考作物蒸散量是一个假想的参考作物蒸散速率,即实际蒸散量的理论上限,其与实际蒸散量相差无几,通常也是计算区域实际蒸散量和湿润指数的基础。

湿润指数可以衡量气候干湿状况,反映水分收支盈亏。探究参考作物蒸散量和湿润指数分布状况和变化规律,对区域自然区划、农业区划和生态景观区划等研究都有重要意义。目前广泛应用于气候的干湿状况变化分析<sup>[1-2]</sup>以及生态环境评估<sup>[3]</sup>等研究中。

参考作物蒸散速率和湿润指数是气温、降水量、太阳辐射和风速等气象因子综合作用的结果,且随气候的变化而变化。IPCC 第一工作组的第五次评估报告指出,1880—2012 年全球海陆表面平均温度呈直线上升趋势,升高了  $0.85^{\circ}\text{C}$ ;2003—2012 年全球平均温度比 1850—1900 年平均温度上升了  $0.78^{\circ}\text{C}$  [4]。全球气候变化推动全球水循环发生变化,水资源的空间分布发生改变,对各地区的干湿状况和水资源的供给平衡产生影响。

自 20 世纪 80 年代以来,中国气候学家对中国大陆现代气候干湿变化做了许多研究。申双和 [5]、马柱国 [6] 等指出近年来中国变湿地区多于变干地区,但干旱化进程大于湿润化进程。北方  $100^{\circ}\text{E}$  以东地区半干旱面积扩大,半湿润面积缩小,气候干旱化,但  $100^{\circ}\text{E}$  以西地区极端干旱区面积在缩小;高歌等 [7] 提出我国长江流域年参考作物蒸散量 20 世纪 60、70 年代偏多,80、90 年代也较同期偏少,且达到了 49 a 来最小值,后有所回升;郭晶 [8],张剑明 [9],黄中艳 [10] 等对广东、云南及湘江流域等地的气候干湿变化进行了研究。刘劲龙等 [11] 对四川盆地气候变化做了研究,认为近 55 a 来四川盆地西部气候变干,东部气候变湿,但干湿变化不显著。

重庆市位于四川盆地东部,地处我国地势第二阶梯向第三阶梯的过渡地带,地势起伏较大,地形复杂,以山地和丘陵为主。重庆市属亚热带湿润季风气候,热量丰富,冬暖夏热,春早秋短,四季分明;霜雪极少,多云雾,少日照;降水丰沛,季节分配不均,雨热同季。在全球气候变化的背景下,近 50 a 来重庆气候也发生了明显变化。1960 年以来,重庆市气温呈上升趋势,经历了暖—冷—暖的阶段变化;同期降雨量呈下降趋势,经历了 1960s 和 1970s 降雨偏多,1980s—2000s 降雨偏少的变化。气温和降雨量的变化必然导致参考作物蒸散量和湿润指数的变化,探讨其变化的特征、规律和成因,具有重要的理论和实际意义。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

本文涉及到的气候资料来源于重庆市气象局 34 个气象站点 1960—2008 年的逐日平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度、风速、气压、降水等气候要素观测资料。

### 1.2 计算方法

参考作物蒸散量是指假设平坦地面被特定矮秆绿色作物(高 0.12 m,地面反射率为 0.23)全部遮蔽,同时土壤保持充分湿润情况下的蒸散量,也称可能蒸

散量或潜在蒸散量。有关参考作物蒸散量的计算方法也有很多,FAO 推荐的彭曼—孟蒂斯公式综合考虑了诸多气候因子,又能更加真实地反映实际气候的蒸散(发)能力,因而在国内外得到广泛应用。本文采用修订的彭曼—孟蒂斯法对重庆市参考作物蒸散量进行计算,计算公式如下 [12]:

$$\text{ET}_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + r(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中:  $\text{ET}_0$ ——日参考作物蒸散量(mm);  $\Delta$ ——饱和水汽压曲线斜率( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ );  $R_n$ ——参考作物表层净辐射 [ $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ];  $G$ ——土壤热通量密度 [ $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ];  $r$ ——干湿表常数( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ );  $T$ ——平均气温( $^{\circ}\text{C}$ );  $u_2$ ——2 米高度处风速( $\text{m/s}$ );  $e_s$ ——饱和水汽压( $\text{kPa}$ );  $e_a$ ——实际水汽压( $\text{kPa}$ )。

在式(1)中  $R_n$  的计算过程中需要涉及到太阳总辐射的计算以及参数的选定。太阳总辐射  $R_s$  计算公式如下 [12]:

$$R_s = (a_s + b_s \times S) R_a \quad (2)$$

式中:  $R_a$ ——天文辐射;  $S$ ——日照百分率;  $a_s, b_s$ ——线性参数,采用 FAO 推荐参数值,即  $a_s = 0.25, b_s = 0.5$ 。以上参数主要适用于北半球中纬度地区天文辐射量的计算,目前国内学者大多沿用这些参数 [13-14]。在气候干旱变化研究中,多采用湿润指数作为干湿气候的区划及气候时间序列变化的标准。湿润指数 ( $W$ ) 是降水量与同时期的参考作物蒸散量之比,公式 [15] 如下:

$$W = \frac{P}{\sum \text{ET}_0} \quad (3)$$

式中:  $W$ ——湿润指数;  $P$ ——年或月降水量(mm);  $\text{ET}_0$ ——日参考作物蒸散量(mm);  $\sum \text{ET}_0$ ——年或月参考作物蒸散量。

## 2 结果与分析

通过对比检验,本文所采用 Penman-Monteith 方法估算的参考作物蒸散量的变化趋势与重庆市沙坪坝气象站近 30 a 的蒸发皿年蒸发量变化情况具有一致性。

### 2.1 重庆市年均温度和年降水量年际变化

经计算得出,近 49 a 来重庆市多站点年均气温约为  $17.4^{\circ}\text{C}$ 。从图 1 可以看出,重庆市年平均气温呈现明显的增加趋势,升温速率为  $0.1^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ 。最冷年出现在 1967 年,该年年均温为  $16.78^{\circ}\text{C}$ 。最暖年为 2006 年,年均温为  $18.6^{\circ}\text{C}$ 。

在气温变暖的背景下,1960—2008 年重庆市年

均降水量呈现下降趋势,速率为 $-9.14 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。全市年均降水量为 $1\,121.8 \text{ mm}$ ,年均降水量最低值为2001年的 $846.91 \text{ mm}$ ,较多年平均值低了 $274.9 \text{ mm}$ ;最高值出现在1968年,为 $1\,360 \text{ mm}$ ,较多年平均值高了 $238 \text{ mm}$ ,最高年均降水量和最低年均降水量相差达到 $513 \text{ mm}$ 。

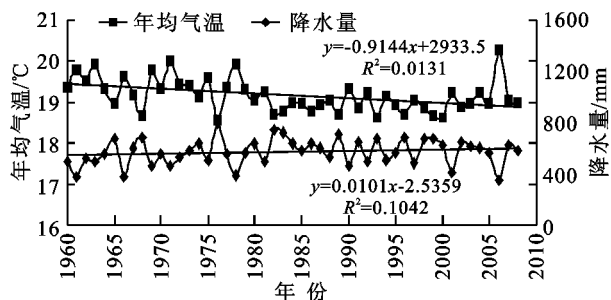


图1 1960—2008年重庆市气温、降水年际变化趋势

## 2.2 重庆市年均参考作物蒸散量、年湿润指数的时空变化

受年均气温和年均降水量变化的影响,重庆市年均参考作物蒸散量和年均湿润指数变化趋势如图2所示:年均参考作物蒸散量以 $-22.6 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的速度下降。其中,1960—1980年年均参考作物蒸散量大幅下降,其线性趋势为 $-27.92 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。1980年以后呈上升趋势,其线性趋势为 $18.82 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ;湿润指数则以 $0.04/10 \text{ a}$ 的速度上升。其中,1960—2000年湿润指数呈上升趋势,线性趋势为 $0.101/10 \text{ a}$ 。2000—2008年出现下降,线性趋势为 $-0.102/10 \text{ a}$ 。

2.2.1 重庆市 $ET_0$ 及湿润指数空间分布特征 重庆市年均参考作物蒸散量空间分布差异较大(图3a),总体上由渝东南地区向渝东北地区

增加的趋势。低值区主要出现在渝东南的酉阳、秀山和黔江,为 $500\sim600 \text{ mm}/\text{a}$ ;渝东北的奉节、巫溪、巫山、云阳以及北碚和万盛地区为高值区,为 $700\sim900 \text{ mm}/\text{a}$ ,最高值出现在奉节,达到 $883 \text{ mm}/\text{a}$ 。全市其余大部地区为 $600\sim700 \text{ mm}/\text{a}$ 。

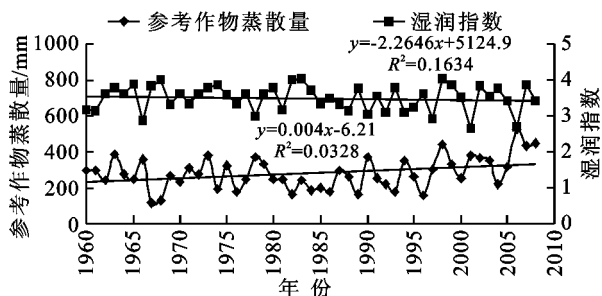


图2 1960—2008年重庆市年均参考作物蒸散量、湿润指数年际变化趋势

从图5a可以看出,重庆市各区县都属湿润地区(湿润指数 $>1$ 即为湿润区<sup>[16]</sup>),多年平均湿润指数为 $1.3\sim3.0$ ,区域之间的湿润指数值差异较大。“湿极”位于渝东南的酉阳地区,湿润指数高达 $3.0$ ,这与渝东南地区纬度较低,且位于东南季风的迎风坡,降水较多有关;重庆市城口县、开县、梁平县、垫江县、长寿区、涪陵区和南川区等地也较为湿润。而“干极”则位于渝东北的奉节县,湿润指数仅 $1.29$ ,这主要是由于该地区降水较少、温度较高且蒸发相对旺盛造成的;其他湿润指数较小的地区主要位于渝东北和渝西北等地,湿润指数均不超过 $1.6$ 。总体而言,重庆市年均湿润指数呈现由渝东南地区向渝东北地区

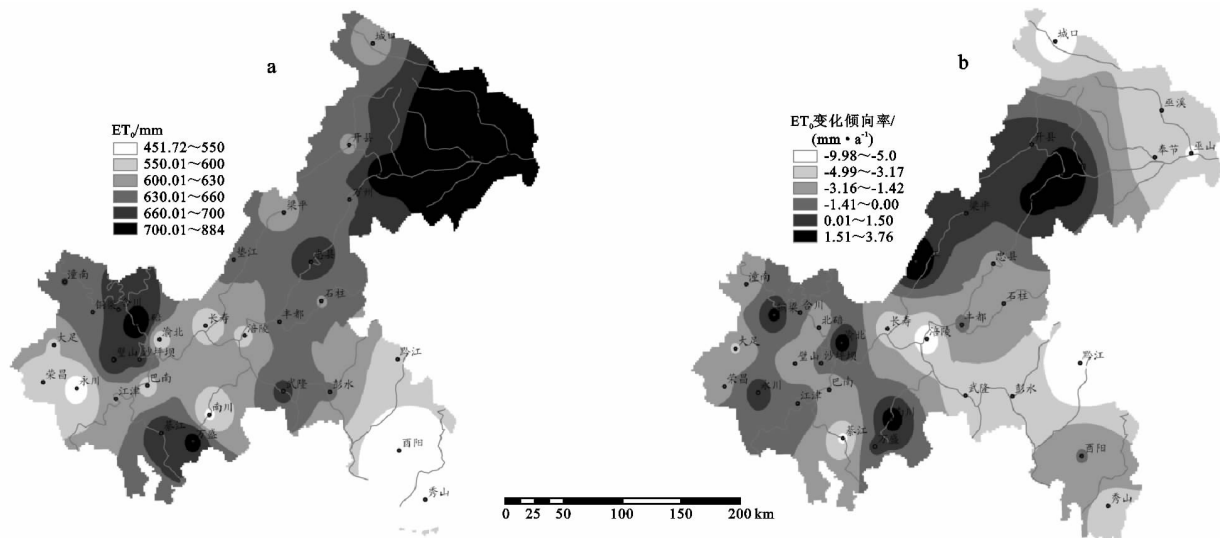


图3 1960—2008年重庆市 $ET_0$ 、 $ET_0$ 变化倾向率空间分布

2.2.2 重庆市 $ET_0$ 及湿润指数的时间变化特征 在对重庆市各气象站点 $ET_0$ 的年际变化特征进行分析后可以发现(表1,图3b),1960—2008年重庆市大多

数地区年均参考作物蒸散量均出现了下降,这与同期全国参考作物蒸散量变化趋势相符合<sup>[17]</sup>。下降趋势最快的是涪陵,线性趋势达到 $-64 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。城口、

綦江、巫山等地下降速度也达到了 $-50\text{ mm}/10\text{ a}$ 以上。万盛、开县、江津等地年均参考作物蒸散量几乎没有发生变化。出现上升的区县只有垫江、云阳、渝北等。在全部 34 个站点中有 24 个站点的变化倾向通过了 0.01 或 0.05 置信度检验。

1960—1980 年重庆市年均参考作物蒸散量减少趋势明显(图 4a),线性倾向率为 $-36.12\text{ mm}/10\text{ a}$ ;全市仅云阳、垫江、彭水、铜梁、沙坪坝 5 个区县年参

考作物蒸散量有所增加,其余地区都呈现减少趋势,如丰都、长寿、潼南、黔江、永川、江津、南川等地的线性倾向率高达 $-80\text{ mm}/10\text{ a}$ 以上。

而 1981—2008 年重庆市年均参考作物蒸散量呈现低水平上的缓慢上升趋势(图 4b),线性倾向率 $19.22\text{ mm}/10\text{ a}$ ;只有酉阳、彭水、黔江、城口等 9 个区县的年均参考作物蒸散量呈现下降,其他地方都有不同程度的上升。

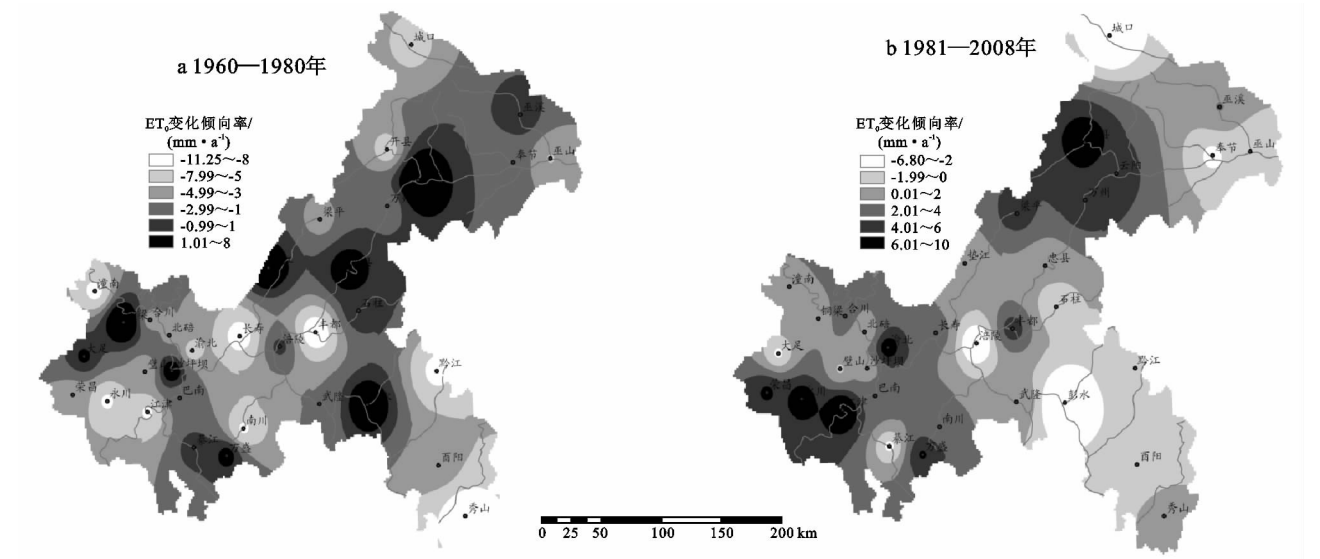


图 4 重庆市不同阶段年均  $ET_0$  变化倾向率空间分布

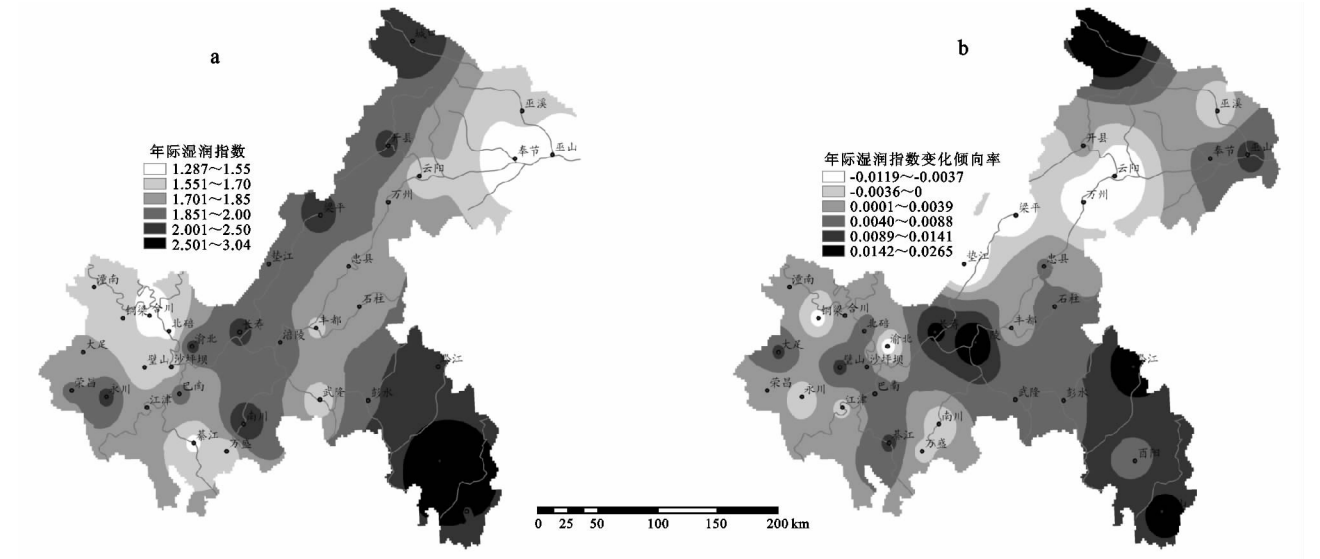


图 5 1960—2008 年重庆市年际湿润指数、年际湿润指数变化倾向率空间分布

表 1 代表站点 $ET_0$ 年际变化倾向率										mm/10 a
站点名称	合川	铜梁	大足	长寿	北碚	璧山	巴南	綦江	涪陵	武隆
倾向率	$-12.43^*$	$20.07^*$	$-33.43^{**}$	$-41.51^{**}$	$-30.38^{**}$	$-32.47^{**}$	$-23.53^{**}$	$-53.23^{**}$	$-64.22^{**}$	$-44.79^{**}$
站点名称	垫江	万州	云阳	奉节	巫山	巫溪	城口	秀山	彭水	石柱
倾向率	$35.16^*$	$19.21^*$	$37.71^{**}$	$-38.29^{**}$	$-50.83^{**}$	$-49.33^{**}$	$-59.93^{**}$	$-33.68^{**}$	$-36.35^{**}$	$-25.00^{**}$

注: \* 和 \*\* 分别表示通过了 0.05 和 0.01 置信度检验,下表同。

1960—2008 年重庆市参考作物蒸散量的四季变化趋势是:春、夏、秋、冬四季的  $ET_0$  与年  $ET_0$  年际变化趋势较为一致,即总体呈现下降趋势,各阶段又有所不同。1960—1980 年,四季的  $ET_0$  呈下降趋势;

1981—2008 年,四季的  $ET_0$  呈上升趋势(表 2)。

从 1960—1980 年、1981—2008 年两时段  $ET_0$  年均值和  $ET_0$  四季均值比较来看(表 3),全市大部分站点 1981—2008 年的  $ET_0$  年均值小于 1960—1980 年的  $ET_0$  年均值,其中城口、黔江、涪陵 3 地两阶段的差值达到 200 mm 以上;仅云阳、垫江、铜梁、万州、渝北、南川 6 地 1981—2008 年的  $ET_0$  年均值大于 1960—1980 年的  $ET_0$  年均值。1960—1980 年与 1981—2008 年两时段  $ET_0$  四季均值变化与  $ET_0$  年

均值变化相似,大部分地区 1981—2008 年四季的  $ET_0$  均值小于 1960—1980 年四季的  $ET_0$  均值。

表 2 重庆市不同时段四季  $ET_0$  变化倾向率

季节	mm/10 a		
	1960—2008 年	1960—1980 年	1981—2008 年
春季	-4.473*	-7.032*	6.138
夏季	-11.855**	-1.861	4.606
秋季	-3.660	-1.636	9.365*
冬季	-3.717**	-5.380*	0.988

表 3 重庆市部分气象站点 1981—2008 年、1960—1980 年两时段  $ET_0$  年均值和四季均值比较

站点	年		春		夏		秋		冬	
	差值/mm	相对值/%	差值/mm	相对值/%	差值/mm	相对值/%	差值/mm	相对值/%	差值/mm	相对值/%
城口	-284.5	-36.18	-69.9	-32.55	-115.7	-35.22	-57.5	-37.73	-41.3	-45.71
黔江	-243.8	-33.4	-63.3	-33.42	-75.7	-27.16	-64.9	-38.31	-39.9	-43.15
涪陵	-206.3	-28.52	-38.1	-22.09	-99.4	-29.47	-47.2	-31.69	-21.6	-33.38
綦江	-187.2	-23.18	-51.7	-23.78	-76.2	-21.93	-33.6	-20.97	-25.8	-31.11
巫山	-169.5	-20.71	-41.4	-19.31	-75.9	-21.47	-32.1	-19.24	-20.1	-23.99
巫溪	-159.4	-18.53	-35.9	-15.52	-57.1	-16.21	-44.0	-23.4	-22.3	-25.26
长寿	-151.9	-22.43	-34.6	-19.85	-62.7	-20.91	-34.2	-24.46	-20.4	-32.28
武隆	-150.8	-19.78	-34.5	-18.13	-66.8	-19.93	-34.1	-21.16	-15.4	-20.32
奉节	-130.8	-13.53	-16.7	-6.99	-73.1	-18.15	-29.2	-13.43	-11.9	-10.95
大足	-117.5	-17.49	-27.2	-14.4	-64.6	-21.98	-16.1	-12.89	-9.6	-14.98
北碚	-114.8	-13.58	-22.8	-10.21	-59.4	-16.17	-20.1	-11.77	-12.5	-14.85
璧山	-111.8	-14.44	-26.0	-12.34	-57.9	-17.47	-14.9	-9.96	-13.1	-15.73
彭水	-110.5	-15.72	-20.5	-12.05	-53.6	-17.3	-23.3	-15.45	-13.2	-18.19
巴南	-109.1	-16.86	-25.4	-15.03	-53.6	-18.25	-19.5	-15.58	-10.6	-17.91
秀山	-108.8	-17.63	-17.3	-11.78	-54.4	-20.11	-24.7	-18.32	-12.4	-19.14
石柱	-100.8	-14.54	-20.4	-11.8	-51.3	-16.8	-18.3	-12.88	-10.9	-14.84
全市	-88.1	-12.84	-18.1	-10.1	-42.1	-14.03	-16.6	-11.86	-11.4	-16.77

注:以上各站点年和四季两阶段差值项均通过了 0.01 置信度检验。

如图 5b 所示,1960—2008 年,重庆市湿润指数变化以上升为主。出现上升的区域包括渝东南沿武隆、涪陵、长寿直至渝西北的合川、潼南的整个带状区域,只有永川、江津、荣昌等地略有下降。就各个阶段而言,先快速上升,后略有下降。1960—2000 年年湿润指数呈现上升趋势,其线性趋势为 0.101/10 a;1980 年以后,湿润指数出现下降,线性趋势为 -0.102/10 a。但并不改变 1960—2008 年重庆市湿润指数上升的总体趋势。

对 1960—2008 年重庆市湿润指数进行 Mann-Kendall 突变检验<sup>[18]</sup>(图 6),UF 曲线在 1973 年以后几乎都大于 0,说明重庆市湿润指数呈现上升趋势。在  $\alpha=0.01(y=\pm 1.96)$  显著性水平下,UB 与 UF 相交于 1979 年,说明重庆市湿润指数的上升是一种突变现象,突变时间就是 1979 年。这与 1979 年以后,重庆市参考作物蒸散量降低有关。就各季节而言,春季、夏季、秋季、冬季的湿润指数距平变化与年变化基本一致。

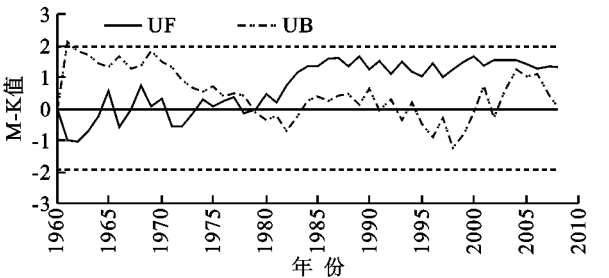


图 6 重庆市湿润指数的 Mann-Kendall 突变检验

### 3 地表湿润指数与各气象因子相关性分析

地表湿润指数的变化与降水量和参考作物蒸散量的关联程度最大,即气候的干湿程度变化很大程度上取决于这两个要素的变化速率。1960—2008 年,重庆市年降水量和参考作物蒸散量都发生了较大变化,而参考作物蒸散量的变化受到诸如温度、湿度、风速、气压等要素的综合作用,因此需要对各气象要素和地表湿润指数进行综合分析方能揭示重庆市气候

干湿变化的原因。

通过将湿润指数与各气象因子做相关分析可以得出(表 4):湿润指数与降水量、相对湿度呈现正相关关系,且全部通过 0.01 的置信度检验,这说明降水量和相对湿度增加都会导致湿润指数的上升。湿润指数与平均气温、最高气温、平均风速、日照时

数以及参考作物蒸散量均呈负相关,其中湿润指数与最高气温之间的相关性最差。综上所述,湿润指数变化是各气象因子综合作用的结果,降水量减少、相对湿度下降以及气温上升、风速加大、日照时数增加所引起的蒸发量的上升都对湿润指数的下降起重要作用。

表 4 1960—2008 年重庆市地表湿润指数与各气象要素的相关系数

	降水量	平均气温	最高气温	最低气温	相对湿度	平均风速	日照时数	参考作物蒸散量
年	0.877**	-0.702**	-0.189	0.008	0.750**	-0.397**	-0.707**	-0.802**
春季	0.912**	-0.310**	-0.206	0.043	0.585**	-0.361**	-0.438**	-0.640**
夏季	0.890**	-0.450**	-0.096	0.047	0.790**	-0.149	-0.599**	-0.704**
秋季	0.942**	-0.807**	-0.468**	-0.362**	0.889**	-0.529**	-0.820**	-0.898**
冬季	0.861**	-0.277*	-0.223	-0.044	0.654**	-0.260	-0.442**	-0.614**

4 结论与讨论

本文采用 1960—2008 年重庆市 34 个站点的气象数据,运用 Penman-Monteith 公式、Mann-Kendall 突变检验、趋势系数、相关分析方法分析了重庆市参考作物蒸散量和地表湿润指数及其时空变化,并讨论了影响地表湿润指数的气象因子,得出以下结论:

(1) 近 49 a 来,重庆市平均气温总体上升速率达到 0.1℃/10 a,表现出先缓慢下降后剧烈上升;年降水量以 9.14 mm/10 a 的速率下降。

(2) 重庆市年均参考作物蒸散量在空间上表现为由渝东南地区向渝东北地区 and 渝中西部地区增加的趋势;时间上表现为 1960—2008 年重庆市参考作物蒸散量的年均值和四季均值都呈下降的趋势,并以 1980 年左右为转折点,1960—1980 年年均值和四季均值均呈快速下降的趋势,而 1981—2008 年则呈缓慢上升的趋势。重庆市年均湿润指数空间分布上表现为由渝东南向渝东北地区和渝中西部地区减小,其中以渝东南的酉阳湿润指数最高;时间上,1960—2008 年重庆市湿润指数先上升,后下降。但并不改变总体的上升趋势,经 Mann-Kendall 突变检验发现突变年是 1979 年。

(3) 影响重庆市地表湿润指数的气象要素很多,表现为与降水量、相对湿度呈现显著的正相关关系,且全部通过 0.01 的显著性水平检验;与平均气温、最高气温、平均风速、日照时数以及参考作物蒸散量呈负相关。不同要素在不同的季节对地表湿润指数影响程度不同。在全球变暖的背景下,近 49 a 来包括中国在内的世界各地的参考作物蒸散量大多呈现出下降趋势<sup>[19-22]</sup>。重庆市参考作物蒸散量的研究结果与此相似,又有所不同:1960—2008 年年均参考作物蒸散量总体呈现下降趋势,但 1980—2008 年却表现

为低水平上的缓慢上升。

目前所使用的气候资料尚存在一定的非均一性问题;不仅城市效应影响观测数据,气象站点分布的合理程度也有待提高。重庆市地形条件较为复杂,山川相连,河流发育,降水、气温、风速、日照时数等要素的分布均受此影响,由此计算出来的参考作物蒸散量和湿润指数亦呈现不均衡分布,使用 ArcGIS 10.0 对参考作物蒸散量和湿润指数的空间插值的方法有待改进。因此文章中的分析结果可能存在一定程度的不确定性和局限性,有待进一步研究和完善。

参考文献:

[1] 韩方,刘朋涛,牛建明,等. 50 a 来内蒙古荒漠草原气候干燥度的空间分布及其演变特征[J]. 干旱区研究, 2013,30(3):449-456.

[2] 普宗朝,张山清,王胜兰,等. 近 48 a 新疆干湿气候时空变化特征[J]. 中国沙漠,2011,31(6):1563-1572.

[3] 周晓东,朱启疆,孙中平,等. 中国荒漠化气候类型划分方法的初步探讨[J]. 自然灾害学报,2002,11(2):125-131.

[4] 高云,罗勇,张军岩. 从哥本哈根气候变化大会看气候变化谈判的焦点问题及 IPCC 第五次评估报告的可能问题[J]. 气候变化研究进展,2010,6(2):83-88.

[5] 申双和,张方敏,盛琼. 1975—2004 年中国湿润指数时空变化特征[J]. 农业工程学报,2009,25(1):11-15.

[6] 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.

[7] 高歌,陈德亮,任国玉,等. 1956—2000 年中国参考作物蒸散量变化趋势[J]. 地理研究,2006,25(3):398-387.

[8] 郭晶,吴举开. 广东省气候干湿状况及其变化特征[J]. 中国农业气象,2008,29(2):157-161.

[9] 张剑明,黎祖贤,章新平. 近 49 a 湘江流域干湿气候变化若干特点[J]. 灾害学,2009,24(4):95-101.

- [6] 夏照华,张克斌,李瑞,等.基于 NDVI 的农牧交错区植被覆盖度变化研究:以宁夏盐池县为例[J].水土保持研究,2006,13(6):178-181.
- [7] 丁涛,李远,刘艳.巴音布鲁克草原主要植被 NDVI 变化与气候因子的关系[J].遥感信息,2009(1):53-59.
- [8] 王永立,范广洲,周定文,等.我国东部地区 NDVI 与气温、降水的关系研究[J].热带气象学报,2009,25(6):725-732.
- [9] 王兮之,陆龙,梁钊雄.青海湟水流域植被覆盖度时空变化分析[J].水土保持研究,2010,17(6):172-176.
- [10] 马安青,高峰,贾永刚,等.基于遥感的贺兰山两侧沙漠边缘带植被覆盖演变及对气候响应[J].干旱区地理,2006,29(2):170-177.
- [11] 付新峰,杨胜天,刘昌明.雅鲁藏布江流域 NDVI 时空分布及与站点气候因子的关系[J].水土保持研究,2006,13(3):229-232.
- [12] 罗玲,王宗明,宋开山,等.1982—2003 年中国东北地区不同类型植被 NDVI 与气候因子的关系研究[J].西北植物学报,2009,29(4):800-808.
- [13] 王灿,任志远,张翀.陕北地区 NDVI 对水热条件年内变化的响应及其空间特征[J].水土保持研究,2014,21(1):173-177.
- [14] 张艺,任志远.基于 SPOT VEGETATION 数据的关中地区近 10 年来植被覆盖变化分析[J].农业系统科学与综合研究,2010,26(4):425-430.
- [15] 鲍雅静,宋国宝,李政海,等.纵向岭谷区植被覆盖的空间分异及其对气候的时滞效应[J].科学通报,2008,52(S2):37-42.
- [16] 丁涛,李远,刘艳.巴音布鲁克草原主要植被 NDVI 变化与气候因子的关系[J].遥感信息,2009(1):53-59.
- [17] 李震,阎福礼,范湘涛.中国西北地区 NDVI 变化及其与温度和降水的关系[J].遥感学报,2005,9(3):308-313.
- [18] 张钛仁,张佳华,申彦波,等.1981—2001 年西北地区植被变化特征分析[J].中国农业气象,2010,31(4):586-590.
- [19] 崔林丽,史军,杨引明,等.中国东部植被 NDVI 对气温和降水的旬响应特征[J].地理学报,2009,64(7):850-860.
- [20] 李霞,李晓兵,陈云浩,等.中国北方草原植被对气象因子的时滞响应[J].植物生态学报,2007,31(6):1054-1062.
- [21] 刘成林,樊任华,武建军,等.锡林郭勒草原植被生长对降水响应的滞后性研究[J].干旱区地理,2009,32(4):512-518.
- [22] 姚俊强,杨青,陈亚宁,等.西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J].生态学杂志,2013,32(5):1283-1291.

~~~~~

(上接第 181 页)

- [10] 黄中艳.1961—2007 年云南干季干湿气候变化研究[J].气候变化研究进展,2010,6(2):113-118.
- [11] 刘劲龙,徐刚,杨娟,等.近 55 a 来四川盆地气候的干湿变化趋势分析[J].西南大学学报,2013,35(1):138-143.
- [12] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements [M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage, 1998.
- [13] 于红博,包玉海,李和平,等.锡林河流域蒸散量遥感反演[J].水土保持研究,2014,21(1):224-228.
- [14] 曲学斌,吴昊.呼伦贝尔市 53 a 气候变化特征分析[J].水土保持研究,2014,21(1):178-182.
- [15] 毛飞,唐世浩,孙涵,等.近 46 a 青藏高原干湿气候区动态变化研究[J].大气科学,2008,32(3):499-507.
- [16] 鞠笑生,杨贤为.我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究[J].应用气象学报,1997,8(1):26-33.
- [17] 任国玉,郭军.中国水面蒸发量的变化[J].自然资源学报,2006,21(1):31-44.
- [18] 魏凤英.现代气象统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999.
- [19] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength [J]. Nature,1995,377(6551):687-688.
- [20] 吴绍洪,尹云鹤,郑度,等.青藏高原近 30 a 气候变化趋势[J].地理学报,2005,60(1):3-11.
- [21] 尹云鹤,吴绍洪,郑度.近 30 a 我国干湿状况变化的区域差异[J].科学通报,2005,50(15):1636-1642.
- [22] 刘昌明,张丹.中国地表潜在蒸散敏感性时空变化特征分析[J].地理学报,2011,66(5):579-588.