

江西省潜在蒸发量变化规律及“蒸发悖论”成因分析

鲁向晖^{1,2}, 白桦^{1,2}, 穆兴民^{2①}, 杨文利¹ (1. 南昌工程学院水利与生态工程学院, 江西 南昌 330099; 2. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为分析过去 55 a 江西省潜在蒸发量的变化趋势, 验证是否存在“蒸发悖论”及原因, 根据江西省 15 个国家气象站 1957—2011 年的逐月气象资料, 选取 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散量 (E_{T0}), 结合空间插值和数据挖掘技术分析 E_{T0} 时空变化规律, 对 Penman-Monteith 公式各自变量求偏导, 以全微分和各自变量的偏导系数分别定量衡量 E_{T0} 变化的成因和对各自变量的敏感性。结果表明, 江西省年 E_{T0} 自 1970 年起显著减少, 气温显著上升, 形成“蒸发悖论”, 1970 年后潜在蒸发量的年均值、汛期均值、非汛期均值相对之前分别减少 0.20、0.10 和 0.31 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 其中日照时数和平均风速减少分别引起年、汛期、非汛期 E_{T0} 减少 0.19 和 0.04、0.13 和 0.03、0.25 和 0.04 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 且 E_{T0} 对日照时数和平均风速的偏导数最大。分析认为江西省 E_{T0} 和气温的差异性变化规律主要是由日照时数和平均风速引起的。

关键词: 蒸发能力; 蒸发悖论; 敏感性分析; Penman-Monteith 公式

中图分类号: P426.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2016)04-0552-06

DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2016.04.006

Trends of Potential Evapotranspiration in Jiangxi Province and Formation of Evaporation Paradox. LU Xiang-hui^{1,2}, BAI Hua^{1,2}, MU Xing-min², YANG Wen-li¹ (1. College of Water and Ecology Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. Soil and Water Conservation and Ecological Environment Research Center, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to analyze potential evapotranspiration in the past 55 years for trend of its variation and validate whether and how "evaporation paradox" existed in Jiangxi Province, monthly meteorological data of the years of 1957–2011 were gathered from 15 national-level meteorological observatories in Jiangxi Province. On such a basis, potential evapotranspiration (E_{T0}) was calculated with the Penman-Monteith formula for analysis of spatio-temporal variation rule of E_{T0} with the spatial interpolation and data mining technology, partial derivatives of each variable of the Penman-Monteith formula derived, and causes of the E_{T0} variation and their sensitivities to each variable quantitated with the help of total differential and partial derivative coefficient of each variable. Results show that since 1970 annual mean E_{T0} in Jiangxi Province had been declining significantly, while temperature there rising remarkably, thus forming obvious "evaporation paradox". Mean potential evaporation of a year, the flood season and the non-flood season was 0.20, 0.10 and 0.31 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively, lower in the years after 1970 than in the years before that. Especially the decrease in sunshine hour and mean wind velocity caused the three indices to fall by 0.19 and 0.04, 0.25 and 0.04, 0.25 and 0.04 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively. Meanwhile, the partial derivative of E_{T0} was the biggest to sunshine hour and mean wind velocity. Analysis in the study demonstrates that the rules of variation of E_{T0} and temperature in Jiangxi Province was mainly determined by duration of sunshine hour and mean wind velocity.

Key words: evaporation power; evaporation paradox; sensitivity analysis; Penman-Monteith formula

潜在蒸发量 (E_{T0}) 可有效表征蒸发能力和能量, 蒸发能力的变化会引发水文循环系统改变, 在特殊水文时段甚至会成为主要控制因素诱发干旱、雾霾等灾害。分析蒸发能力的变化, 解释其变化成因, 可从气象角度预警灾害的发生。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 在第 5 次报告中指出, 1880—2012 年间全球气温升高 0.85 $^{\circ}\text{C}$ ^[1], 潜在蒸发量也将随着气候变暖而发生变化, 其变化趋势必

将对区域水文循环系统的改变产生影响。因此, 研究区域 E_{T0} 的变化规律对于预测气象干旱、合理利用水资源可提供较强的理论支撑。在全球气候变

收稿日期: 2015-06-03

基金项目: 国家自然科学基金 (31360175); 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ151123); 江西省水利厅科技项目 (KT201213, KT201540)

① 通信作者 E-mail: xmmu@ms.iswc.ac.cn

暖的背景下,大多数研究表明 E_{T0} 呈现下降趋势,存在“蒸发悖论”(evaporation paradox)^[2-4]。“蒸发悖论”最早由 MICHAEL 等^[5]提出,已在世界多个地方得到验证^[6-10]。江西省属亚热带季风气候区,水资源总量充足,但近年来季节性干旱频发,伏秋季降水随着主汛期结束逐渐减少,蒸发成为控制该时段水分运移过程的要素,而位于南方红壤丘陵区中心的江西省是否存在“蒸发悖论”尚鲜见研究。采用江西省 1957—2011 年的逐月气象资料,依据 Penman-Monteith 公式^[11]计算月 E_{T0} ,并以泰森多边形法计算江西省平均逐月 E_{T0} 时间序列,利用克里格插值和时间序列分析方法揭示气象要素、 E_{T0} 的时空变化规律,结合气温和 E_{T0} 的趋势分析是否存在“蒸发悖论”;衡量 E_{T0} 突变点前后的数值变化,利用 Penman-Monteith 公式推求 E_{T0} 变化量的全微分方程,计算各气象要素对 E_{T0} 变化的贡献,并以各气象要素对应偏微分系数表征其对 E_{T0} 变化的敏感程度。研究成果可为江西省气象灾害防控提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江西省地处中亚热带温暖湿润季风气候区,气候温和,年均温约 16.3~19.5℃,冬暖夏热,年无霜期 240~307 d,活动积温 5 000~6 000℃,利于水稻生长,是我国主要的粮食主产区;年降水量 1 341~1 943 mm,是我国多雨省区之一,地区分布呈南多北少、东多西少、山区多盆地少,降水年际变化很大,季节分配不均,旱涝灾害频繁。水资源丰富,全省河川多年平均径流总量为 1 385 亿 m^3 ,径流总量居全国第 7 位,地下水天然资源多年平均值为 212 亿 m^3 以上。地形南高北低,以丘陵山地为主,盆地、谷地广布,江湖众多。地带性土壤为红壤和黄壤,植被以常绿阔叶林为主,具有典型的亚热带森林植物群落。

1.2 数据来源

采用江西省 15 个国家气象站 1957—2011 年的逐月气象资料,资料来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>),站点分布见图 1。利用 Penman-Monteith 公式计算 E_{T0} ,结合空间插值和数据挖掘技术分析 E_{T0} 时空变化规律,对 Penman-Monteith 公式各自变量求偏导,以全微分和各自变量的偏导系数分别定量衡量 E_{T0} 变化的成因和对各自变量的敏感性。

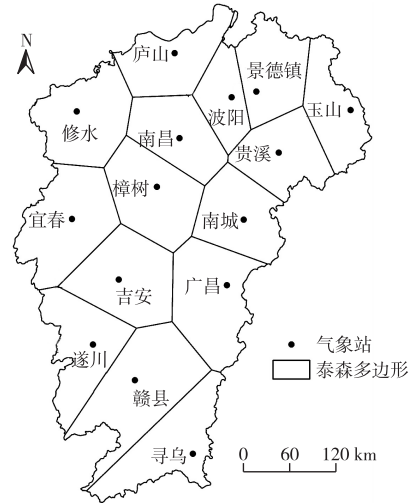


图 1 江西省国家气象站分布示意

Fig. 1 Distribution of the national meteorological observatories in Jiangxi Province

1.3 计算方法

1.3.1 潜在蒸发量的计算及敏感性分析

潜在蒸发量本质上是关于风速、平均气温、平均最高气温、平均最低气温、日照时数和相对湿度的函数,即:

$$E_{T0} = f(T, T_{\max}, T_{\min}, v, N, H_R). \quad (1)$$

式(1)中, E_{T0} 为潜在蒸发量, $mm \cdot d^{-1}$; T 为年平均温度, $^{\circ}C$; T_{\max} 为年平均最高气温, $^{\circ}C$; T_{\min} 为年平均最低气温, $^{\circ}C$; v 为年平均风速, $m \cdot s^{-1}$; N 为日平均日照时数, h ; H_R 为年平均相对湿度, %。

根据 E_{T0} 对平均气温、平均最高气温、平均最低气温、风速、日照时数、相对湿度求偏导,转化为偏微分方程,即:

$$\Delta E_{T0} = \frac{\partial f}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial f}{\partial T_{\max}} \Delta T_{\max} + \frac{\partial f}{\partial T_{\min}} \Delta T_{\min} + \frac{\partial f}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial f}{\partial N} \Delta N + \frac{\partial f}{\partial H_R} \Delta H_R. \quad (2)$$

式(2)中,每一项 Δ 分别为对应气象要素突变前期与突变后期的变化值。式(2)右侧各变量偏微分系数的绝对值越大,表明该气象要素对 E_{T0} 越敏感,即对 E_{T0} 变化的影响越大。

1.3.2 分析方法

采用的数据分析方法主要包括 Mann-Kendall 非参数趋势检验法、Pettitt 突变点检验及回归分析法。采用 Mann-Kendall 非参数趋势检验法分析气候要素长期变化趋势,可以事先不必假定数据的分布特征;Pettitt 法是直接利用秩序列来检测突变点的分析方法;回归分析是确定 2 种或 2 种以上变量

之间相互依赖的定量关系的一种统计分析方法。

2 结果与分析

2.1 江西省年 E_{T0} 的空间变化

基于江西省 15 个国家气象站的月气象资料 (月降水量、日最高气温、日最低气温、日大气压力、日相对湿度、日照时数),采用 Penman-Monteith 公式和泰森多边形法(图 1)计算各站和江西省年 E_{T0} 、气象要素年时间序列。经 Kolmogorov-Smirnov 方法^[12]验证,各站多年平均 E_{T0} 符合正态分布,采用普通克里格插值方法绘制江西省多年平均 E_{T0} 等值线(图 2)。由图 2 可见,江西省多年平均日 E_{T0} 在 2.57~3.17 mm 之间变化,自西北向东南递增,最大和最小值分别位于赣县和庐山附近。

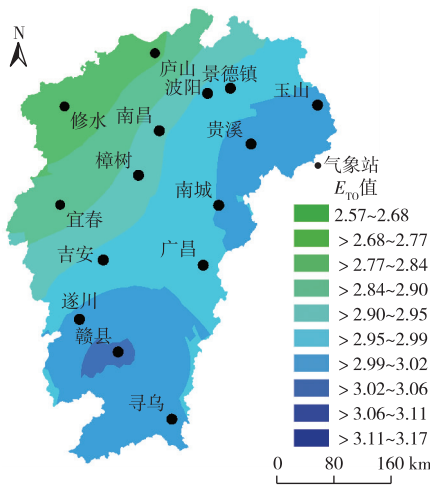


图 2 江西省多年平均潜在蒸发量(E_{T0})等值线图

Fig.2 Isoline of annual mean E_{T0} of Jiangxi Province

采用线性回归法分析江西省 15 个国家气象站 E_{T0} 的变化趋势(表 1),可以发现,14 个气象站的年 E_{T0} 呈下降趋势,占总站数的 93.33%;9 个气象站的下降趋势通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,占总站数的 60%。年平均日 E_{T0} 高值区分布在江西省北部偏东、中部偏东以及赣南大部分地区,其下降趋势显著;北部鄱阳湖周边地区为相对低值地区,下降趋势不明显。

2.2 江西省年 E_{T0} 及气象要素的年际变化

基于江西省年 E_{T0} 及其相关气象要素年时间序列,采用线性回归方法分析其趋势,选定显著性水平 $\alpha=0.05$ 对回归方程的相关系数进行检验(表 2)。由表 2 可知,年平均、最高及最低气温呈显著上升趋势,年 E_{T0} 、年平均风速和年均日照时数呈现显著下降趋势,年降水量、年平均气压无明显变化

趋势。由年 E_{T0} 与气象要素之间的关系可知,年 E_{T0} 的减小趋势主要是由年均日照时数和风速的减小引起的。

表 1 江西省各气象站潜在蒸发量变化趋势

Table 1 Trends of the variation of E_{T0} at the meteorological stations of Jiangxi Province

区域	气象站	线性回归方程	样本数	显著性
赣北	樟树	$y = -0.0063x + 15.326$	55	--
	宜春	$y = -0.0038x + 10.314$	55	--
	修水	$y = -0.0003x + 3.1937$	55	NS
	玉山	$y = -0.0020x + 6.9729$	55	NS
	庐山	$y = -0.0010x + 4.6089$	55	NS
	景德镇	$y = -0.0040x + 10.953$	55	--
	贵溪	$y = -0.0075x + 17.971$	55	--
	南昌	$y = -0.0036x + 10.164$	55	NS
	波阳	$y = -0.0061x + 15.228$	55	--
	赣中	南城	$y = -0.0003x + 3.7109$	55
广昌		$y = -0.0051x + 12.955$	55	--
吉安		$y = -0.0071x + 17.038$	55	--
遂川		$y = 0.0002x + 2.6641$	55	NS
赣南	寻乌	$y = -0.0032x + 9.2941$	55	--
	赣县	$y = -0.0034x + 9.9674$	55	--

--表示显著下降趋势; NS 表示变化趋势不显著。x 和 y 分别表示时间序列及对应年潜在蒸发量。

表 2 江西省年潜在蒸发量与相关气象要素的变化趋势

Table 2 Variation trends of annual E_{T0} and related meteorological factors in Jiangxi Province

气象要素	线性回归方程	样本数	显著性
年平均降水量	$y = 1.281x - 910.6$	55	NS
年平均气温	$y = 0.015x - 12.95$	55	++
年平均风速	$y = -0.017x + 37.41$	55	--
年平均日照时数	$y = -5.579x + 12814$	55	--
年平均水汽压	$y = 0.371x + 1367$	55	NS
年平均相对湿度	$y = -0.042x + 162.7$	55	--
年平均最高气温	$y = 0.011x - 0.165$	55	++
年平均最低气温	$y = 0.019x - 24.56$	55	++
年平均潜在蒸发量	$y = -0.003x + 3.042$	55	--

--表示显著下降趋势; ++表示显著上升趋势; NS 表示变化趋势不显著。x 和 y 分别表示时间序列及所在行对应的各年气象要素值。

根据江西省年 E_{T0} 序列,采用 Pettitt 法和 Morlet 小波分析(显著性水平取 0.05)检验该序列的突变点和主周期(图 3~4)。由图 3~4 可知,江西省年 E_{T0} 突变点发生在 1971 年,自 1971 年起显著减小,江西省年潜在蒸发量第 1 主周期为 30 a,第 2 主周期为 18 a。

2.3 江西省“蒸发悖论”的成因分析

2002 年, MICHAEL 等^[5]将蒸发量变化的预期值与观测值相悖称为“蒸发悖论”。前文分析结果表明,江西省存在“蒸发悖论”现象,与国内外当前

已有的研究结论^[13-14]一致,与中国的总体规律^[15]相符。由 E_{T0} 的计算函数可以看出,影响 E_{T0} 的因子主要包括最高气温、最低气温、平均气温、相对湿度、平均风速和日照时数等,每一个因子的变化或多个因子的相互作用都会使 E_{T0} 产生变化,但各气象因子之间的相互作用及影响复杂。因此,根据 1957—2011 年的气象数据资料及突变点分析结果,计算各气象要素对 E_{T0} 的贡献量(表 3)。表 3 显示,日照时数和平均风速的变化与 E_{T0} 的变化呈正相关关系,气温和相对湿度的变化与 E_{T0} 的变化呈负相关关系,日照时数对江西省年均 E_{T0} 变化的贡献率最大(93.76%)。

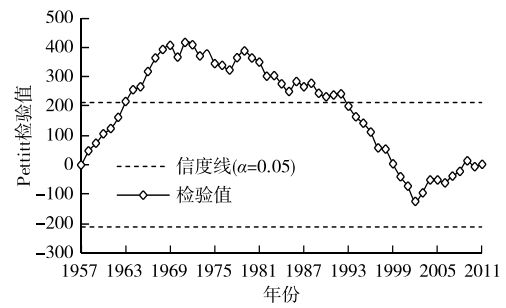


图 3 江西省年潜在蒸发量序列的 Pettitt 检验
Fig. 3 Pettitt test of annual mean E_{T0} in Jiangxi Province

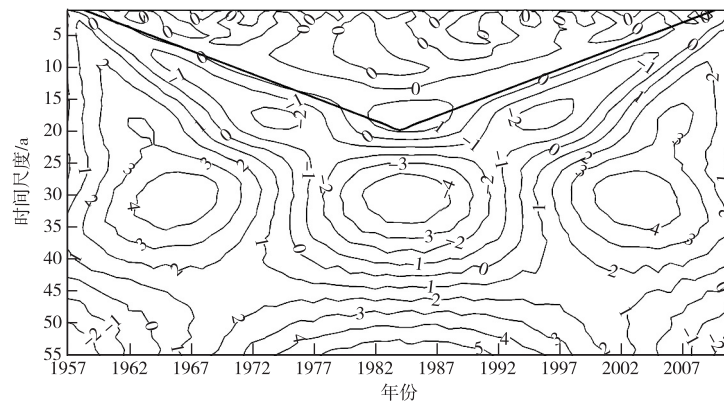


图 4 江西省年潜在蒸发量序列小波系数时频分布
Fig. 4 Time-frequency distribution of the wavelet coefficients of annual mean E_{T0} in Jiangxi Province

表 3 各气象要素贡献量

Table 3 Contribution of various meteorological elements

项目	平均最低气温/ ℃	平均最高气温/ ℃	平均相对湿度/ %	平均风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	日照时数/ h	平均温度/ ℃	E_{T0} / ($mm \cdot d^{-1}$)
突变前期	15.33	23.70	79.34	2.46	5.03	19.51	3.08
突变后期	15.66	23.72	78.80	2.06	4.53	19.69	2.87
平均值	14.19	22.44	78.03	2.17	4.79	18.31	2.97
Δ (后-前)	0.33	0.02	-0.54	-0.40	-0.49	0.18	-0.20
$\partial f / \partial x^1$	0.016 3	0.025 6	-0.030 6	0.101 4	0.384 2	0.030 6	
贡献量 ¹⁾	0.005 4	0.000 5	0.016 4	-0.040 4	-0.189 2	0.005 4	-0.20
贡献率 ¹⁾	-2.68%	-0.26%	-8.15%	20.01%	93.76%	-2.67%	100%

Δ (后-前)为各气象要素突变点后相对之前的变化量; $\partial f / \partial x$ 为年潜在蒸发量相对于所列气象要素年统计值偏导数的多年均值。1) 无量纲。

利用 Mann-Kendall 突变点检验方法对江西省 1957—2011 年年平均日照时数时间序列突变点及显著程度进行分析(图 5),江西省年平均日照时数呈显著下降趋势,突变点发生在 1976 年,与 E_{T0} 的突变时间较为接近。对江西省 15 个国家气象站点多年平均日照时数变化趋势进行分析, E_{T0} 突变前期(1957—1970 年)和突变后期(1971—2011 年)全省日照时数的变化量等值线图(图 6)显示,江西省大

部分地区日照时数近年来都呈减少趋势,日照时数相对高值区主要集中在赣北和赣南地区,并且由赣北、赣南地区向赣中地区发展,赣北地区日照时数变化最为明显。日照时数减少导致地球表面接受到的太阳辐射下降,进而会导致蒸发所需的潜热通量减少,这也证实了日照时数的减少是 E_{T0} 降低的主导因素。

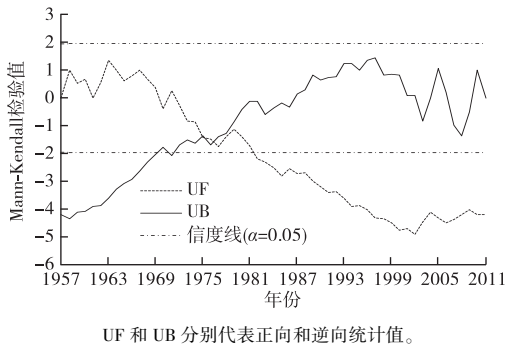


图5 江西省年日照时数 Mann-Kendall 检验
Fig.5 Mann-Kendall test of annual mean sunshine hour in Jiangxi Province

为了检验结果一致性,将1957—2011年气象数据资料按照汛期(4—6月)、非汛期(7—次年3月)分类,根据突变分析结果,分别计算各个气象要素对 E_{T0} 的贡献量,计算结果见表4~5。

表4 汛期各气象要素贡献量

Table 4 Contributions of various meteorological elements in flood seasons

项目	平均最低气温/ ℃	平均最高气温/ ℃	平均相对湿度/ %	平均风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	日照时数/ h	平均温度/ ℃	$E_{T0}/$ ($mm \cdot d^{-1}$)
突变前期	18.06	26.00	81.68	2.38	4.64	22.03	3.009
突变后期	18.44	26.36	80.44	2.06	4.33	22.40	2.913
平均值	18.25	26.18	81.06	2.22	4.48	22.21	2.96
Δ (后-前)	0.38	0.37	-1.23	-0.32	-0.31	0.37	-0.10
$\partial f/\partial x^1$	0.015 6	0.023 8	-0.034 5	0.107 5	0.412 6	0.024 1	
贡献量 ¹⁾	0.005 9	0.008 7	0.042 5	-0.034 1	-0.129 8	0.009	-0.10
贡献率 ¹⁾	-6.05%	-8.91%	-43.48%	34.89%	132.73%	-9.18%	100%

Δ (后-前)为各气象要素突变点后相对之前的变化量; $\partial f/\partial x$ 为年潜在蒸发量相对于所在列气象要素年统计值偏导数的多年均值。1)无量纲。

表5 非汛期各气象要素贡献量

Table 5 Contributions of various meteorological elements in non-flood seasons

项目	平均最低气温/ ℃	平均最高气温/ ℃	平均相对湿度/ %	平均风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	日照时数/ h	平均温度/ ℃	$E_{T0}/$ ($mm \cdot d^{-1}$)
突变前期	12.60	21.40	77.00	2.54	5.41	17.00	3.11
突变后期	12.88	21.08	77.16	2.06	4.74	16.98	2.80
平均值	12.74	21.24	77.08	2.30	5.08	16.99	2.96
Δ (后-前)	0.28	-0.32	0.16	-0.48	-0.67	-0.02	-0.31
$\partial f/\partial x^1$	0.017 1	0.027 5	-0.031 0	0.090 2	0.379 2	0.033 7	
贡献量 ¹⁾	0.004 9	-0.008 9	-0.004 9	-0.043 2	-0.254 2	-0.000 7	-0.31
贡献率 ¹⁾	-1.59%	2.91%	1.59%	14.08%	82.79%	0.22%	100%

Δ (后-前)为各气象要素突变点后相对之前的变化量; $\partial f/\partial x$ 为年潜在蒸发量相对于所在列气象要素年统计值偏导数的多年均值。1)无量纲。

从上述分析可知,江西省在汛期和非汛期均存在“蒸发悖论”,且“蒸发悖论”现象在非汛期表现更明显。全年平均、汛期和非汛期3个时期的分析结果均表明,风速、日照时数改变与潜在蒸发量变化呈正相关关系,这些气候要素的减小将会使潜在蒸发量减小。全年风速和日照时数对潜在蒸发量变

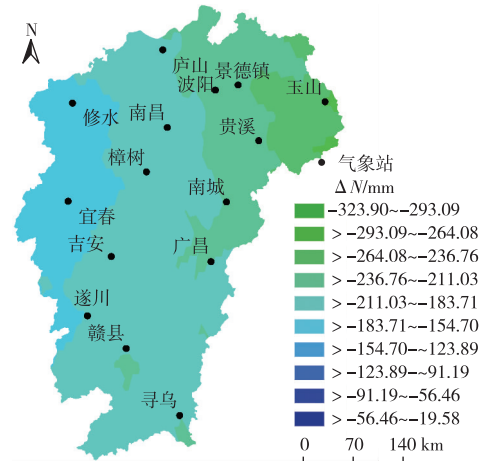


图6 江西省多年平均日照时数变化量(ΔN) (1971年前后)等值线图

Fig.6 Isoline of the variation of annual mean sunshine hour in the years before and after 1970

化的贡献量分别为-0.040 4和-0.189 2;汛期风速和日照时数的贡献量分别为-0.034 1和-0.129 8;非汛期风速和日照时数的贡献量分别为-0.042 3和-0.254 2。可见,日照时数和风速为潜在蒸发量的主导因素,其中日照时数是最主要的因素。

3 结论与讨论

1957—2011年,江西省气温上升趋势显著,年平均风速与年均日照时数呈现显著下降趋势,年降水量、年平均气压无明显变化趋势。江西省年平均气温自1970年起显著上升, E_{T0} 显著减少,存在“蒸发悖论”。不管是年尺度还是汛期及非汛期,“蒸发悖论”现象均存在,且在非汛期表现更明显。日照时数和平均风速的变化是导致江西省“蒸发悖论”存在的主要原因。

在全球气候变化背景下,近年来江西省干旱频发,时间延长,对农业生产造成了严重影响。潜在蒸发量是确定作物需水量的主要参数,气候变化对潜在蒸发量的影响十分复杂,虽然笔者研究认为影响潜在蒸发量下降的主要因素是日照时数和平均风速的变化,但随着人类活动影响的不断增强,对潜在蒸发量产生影响的其他不确定因素还有很多。因此,深入研究潜在蒸发量的内在影响机理,是解释区域极端气候变化的需求,是未来气候变化中需要深入研究的方面。

参考文献:

- [1] IPCC.政府间气候变化专门委员会第五次评估报告第一工作组报告:气候变化2013:自然科学基础[M].剑桥,英国:剑桥大学出版社,2013:3.
- [2] 马雪宁,张明军,王圣杰,等.“蒸发悖论”在黄河流域的探讨[J].地理学报,2012,67(5):645-656.
- [3] 李敏敏,延军平.“蒸发悖论”在北方农牧交错带的探讨[J].资源科学,2013,35(11):2298-2307.
- [4] 蒋冲,王飞,刘思洁,等.“蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨[J].生态学报,2013,33(3):844-855.
- [5] MICHAEL L R, GRAHAM D F. The Cause of Decreased Pan Evaporation Over the Past 50 Years [J]. Science, 2002, 298 (15): 1410-1411.
- [6] MICHAEL L R, GRAHAM D F. Changes in Australian Pan Evaporation From 1970 to 2002 [J]. International Journal of Climatology, 2004, 24(9): 1077-1090.
- [7] MOONEN A C, ERCOIL L, MARIOTTI M, et al. Climate Change in Italy Indicated by Agrometeorological Indices Over 122 Years [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111(1): 13-27.
- [8] TEBAKARI T, JUNICHI Y, SUVANPIMOL C. Time-Space Trend Analysis in Pan Evaporation Over Kingdom of Thailand [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2005, 10(3): 205-215.
- [9] BURN D H, HESCH N M. Trends in Evaporation for the Canadian Prairies [J]. Journal of Hydrology, 2007, 336(1/2): 61-73.
- [10] HUANG H, HAN Y, CAO M, et al. Spatiotemporal Characteristics of Evapotranspiration Paradox and Impact Factors in China in the Period of 1960-2013 [J]. Advances in Meteorology, 2015(4): 1-10.
- [11] MONTEITH J L. Environmental Control of Plant Growth [M]. New York, USA: Academic Press, 1963: 95-112.
- [12] RICHARD K M, MORLET J, ALEXANDRE G. Analysis of Sound Patterns Through Wavelet Transforms [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1987, 1(2): 273-302.
- [13] 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.
- [14] 韩松俊,王少丽,杨大文.农业活动对中国区域“蒸发悖论”规律的影响[J].农业工程学报,2010,26(10):1-8.
- [15] 丛振涛,倪广恒,杨大文,等.“蒸发悖论”在中国的规律分析[J].水科学进展,2008,19(2):147-152.

作者简介:鲁向晖(1976—),男,陕西临潼人,讲师,博士,主要研究方向为水土流失防治与气候变化。E-mail: xianghuilu@nit.edu.cn

(责任编辑:许素)