

黔中地区近 60 年潜在蒸散量时空变化特征及 主导因素识别

肖 杨, 周 旭, 罗 雪, 李洪广, 梁任刚, 杨大方

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025)

摘 要:潜在蒸散量是水文循环和全球能量平衡的组成部分,其长期变化在气候变化研究中备受关注,研究其变化对区域的水资源配置、农业发展、生态环境保护等具有重要意义。基于 1960—2019 年黔中地区 11 个气象站点逐日气象数据,利用 Penman-Monteith 模型计算潜在蒸散量,采用 Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验、小波分析等方法分析了年均及四季潜在蒸散量时空变化特征与周期变化特征;结合相关分析法对影响潜在蒸散量的主要气象要素进行研究。结果表明:(1) 1960—2019 年黔中地区潜在蒸散量呈显著下降趋势,变化率约为 $-6.00 \text{ mm}/10 \text{ a}$,且在年际、年代际与季节尺度变化中存在明显差异性。(2) 春夏秋冬四季潜在蒸散量整体呈减小趋势,变化率分别为 $-2.10 \text{ mm}/10 \text{ a}$, $-3.01 \text{ mm}/10 \text{ a}$, $-0.17 \text{ mm}/10 \text{ a}$, $-0.62 \text{ mm}/10 \text{ a}$,夏春两季潜在蒸散量占全年的 65.91%,是影响年潜在蒸散量下降的主要原因。(3) 潜在蒸散量空间分布特征呈自南向北递减趋势,其变化趋势在地区中部(东南—西北走向)呈下降趋势、在地区的南北部呈现增加趋势。(4) 潜在蒸散量在 1969 年左右发生一次明显的突变,并存在 21 a 的主周期和 3 a 次周期。(5) 研究区存在“蒸发悖论”现象,日照时数是影响潜在蒸散量变化的主导气象因素,其次是风速,且各气象因素在季节上对潜在蒸散量影响存在差异性。研究可为变化环境下的黔中地区水资源合理配置和农业生产提供一定的科学依据。

关键词:潜在蒸散量; Penman-Monteith 模型; 气象因素; 时空变化; 黔中地区

中图分类号:P426.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0190-09

Spatiotemporal Variation Characteristics of Potential Evapotranspiration and Identification of Leading Factors in Central Guizhou in Recent 60 Years

XIAO Yang, ZHOU Xu, LUO Xue, LI Hongguang, LIANG Rengang, YANG Dafang

(School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 500025, China)

Abstract: Potential evapotranspiration is a component of the hydrological cycle and global energy balance. Its long-term changes have attracted much attention in climate change research. Research on its changes is of great significance to regional water resources allocation, agricultural development, and ecological environment protection. Based on the daily meteorological data of 11 meteorological stations in central Guizhou from 1960 to 2019, the Penman-Monteith model was used to calculate the potential evapotranspiration, and the temporal and spatial variation characteristics and periodic variation characteristics of annual average and four seasonal potential evapotranspiration were analyzed by using Theil-Sen median trend analysis, Mann-Kendall test, and wavelet analysis. Correlation analysis method was use to study the main meteorological elements that affected potential evapotranspiration. The results show that: (1) the potential evapotranspiration in central Guizhou showed a significant downward trend from 1960 to 2019, with a change rate of about $-6.00 \text{ mm}/\text{decade}$, and there were obvious differences in the interannual, interdecadal and seasonal scales; (2) the overall potential evapotranspiration in the four seasons showed a decreasing trend, with the rate of change being $-2.10 \text{ mm}/\text{decade}$, $-3.01 \text{ mm}/\text{decade}$, $-0.17 \text{ mm}/\text{decade}$, and $-0.62 \text{ mm}/\text{decade}$; that the potential evapotranspiration in summer and spring accounted for the 65.91% of the total aannual potential evapo-

收稿日期:2020-11-04

修回日期:2020-11-17

资助项目:贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2017]2855);贵州省科学技术项目(黔科合基础[2017]1131)

第一作者:肖杨(1994—),男,贵州铜仁人,硕士研究生,研究方向为土地利用变化与生态系统服务。E-mail:599588405@qq.com

通信作者:周旭(1981—),男,四川古蔺人,博士,副教授,主要从事遥感水文与流域管理研究。E-mail:zxzy8178@163.com

transpiration was the main reason for the decline in annual potential evapotranspiration; (3) the spatial distribution of potential evapotranspiration was decreasing from south to north, and its change trend was decreasing in the middle (southeast northwest) and increasing in the north and south parts of the region; (4) the potential evapotranspiration had an obvious sudden change in 1969, and there was 21-year main cycle and a 3-year secondary cycle; (5) there was a ‘evaporation paradox’ phenomenon in the study area; Sunshine hours were the main meteorological factors affecting the variation of potential evapotranspiration, followed by wind speed, and the influence of various meteorological factors on the potential evapotranspiration varied seasonally. This research can provide a certain scientific basis for the rational allocation of water resources and agricultural production in central Guizhou under the changing environment.

Keywords: potential evapotranspiration; Penman-Monteith model; meteorological factors; spatial and temporal variations; central Guizhou

蒸散量作为区域能量平衡和水分循环的重要控制因素,是评估气候变化、水资源配置、作物需水量、干旱预测与预警、生态环境保护等领域的关键指标^[1-2]。在全球气候变化的背景下,不同区域潜在蒸散量变化存在差异性,其影响潜在蒸散量变化原因不同,逐渐成为区域水文气候变化研究的重点与热点^[3-4]。全球气候变暖已成为不争的事实,气温上升会加速水文循环,导致潜在蒸散量增加^[5-6]。但是,有些地区潜在蒸散量呈减少趋势,被称为“蒸发悖论”现象^[7-8]。如前苏联^[9]、美国^[10]、新西兰^[11]、泰国等^[12]。然而,在其他地区潜在蒸散量呈增加趋势,如伊朗^[13]、北美东北部^[14]、非洲尼罗河沿岸国家等^[15]。在中国长江上游^[16]、东北北部^[17]的年潜在蒸散量显著增加,在淮河流域^[18]、长江中下游地区^[19]和珠江流域^[20]的年潜在蒸散量显著减少。同时,上述研究确定了影响潜在蒸散量变化的主要气候因素,由于区域差异性,研究结果存在异质性。一些学者将潜在蒸散量的变化归因于日照时数或太阳辐射^[10-11,13],另外学者则认为风速是导致下降趋势的主要因素^[18-19]。此外,气候因素之间的相互影响也是促成潜在蒸散量变化的重要原因。因此,在区域尺度上研究潜在蒸散量的时空变化趋势及其驱动因素,对厘清区域与气候变化的响应具有重要意义^[21]。

黔中地区水资源丰富,但时空分布不均,且该区域为喀斯特山区,自然基底的异质性和生态环境的脆弱性,加上二元三维水文地质结构影响^[22],水资源不易储存于地表,导致水资源稀缺问题突出。受气候变暖影响,加之农业基础条件较为薄弱,出现水旱灾害较多^[23]。近年来,工业经济发展快速,对水资源的需求量较大,水量平衡各项的变化对地区工农业发展及水文过程产生巨大影响,进而对地区水安全和粮食安全带来严峻挑战。潜在蒸散量的研究可分析黔中地区可获得水资源量及水分消耗过程,且潜在蒸散量的

变化可为各种作物需水量的计算提供科学依据,进而制定合理的灌溉制度,达到节水目的。基于此,本文利用 1960—2019 年黔中地区日气象数据,采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 方法,计算黔中地区日潜在蒸散量,基于 Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验、小波分析等方法分析年均及四季潜在蒸散量时空变化特征与周期变化特征,通过相关性分析研究黔中地区潜在蒸散量和气象因素的变化趋势并识别影响潜在蒸散量变化的主导因素。可为该地区水资源优化配置、农业需水预测、制定合理灌溉方案和农作物种植结构调整提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黔中地区位于贵州省中部地区,包括贵阳、遵义、安顺、毕节、黔东南和黔南 6 个市(州),涉及贵安新区在内的 33 个县(市、区),总面积 53 800 km²,占贵州省面积的 31%^[24]。地势自西向东倾斜,属亚热带高原季风性气候,大部分地区为喀斯特丘陵地貌,年均温约为 15.04℃,年降水量约为 1 163.79 mm,年日照时数 1 175.62 h。土壤类型以黄壤、石灰土、水稻土、沼泽土等为主^[25]。区域森林覆盖率高,以常绿阔叶林为主,自然资源丰富,是适宜居住的绿色生态聚居地^[24]。

1.2 数据来源

本文采用的气象数据来自中国气象数据网(<http://data.com.cn>),根据数据的连续性和时序性尽可能长的标准,选用黔中地区 11 个气象站点(图 1),时间序列为 1960—2019 年,数据包括日平均气温、日平均最高气温、日平均最低气温、日平均相对湿度、日平均风速、日平均日照时数等。计算各站点的日潜在蒸散量,然后进行月、季、年潜在蒸散量的统计,季节的划分为 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12—2 月为冬季^[26]。气象资料空间插值法在通过多种

插值法进行准确度分析后采用反距离权重法^[26]。

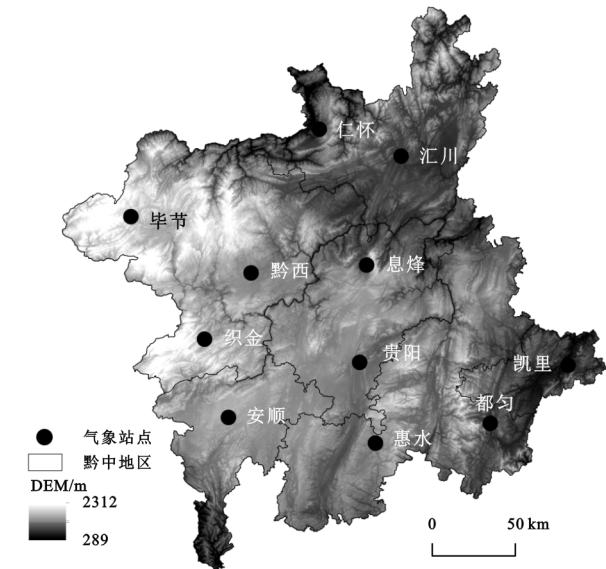


图 1 黔中地区地理位置及气象站点位置

2 研究方法

2.1 Penman-Monteith 模型

计算潜在蒸散量的方法很多,应用最广泛的是联合国粮农组织(FAO)1998 年推荐的 Penman-Monteith 模型^[5-6,10],该模型基于能量平衡和水汽扩散理论,考虑作物的生理特性和空气动力学参数的变化,具有坚实的理论基础,物理意义明确,在各种气候和时间步长计算中证明效果良好,无需任何局部校准^[8,10]。

2.2 线性回归分析

假设公式 $y=ax+b$ 中, y 表示特定时间序列下气候要素的变化趋势^[27], x 为年序, a 表示一元线性方程的斜率,即为气象要素的线性变化趋势,若 a 为正时,则表示气候要素呈增加趋势, a 为负时,表示气候要素呈减小趋势。

2.3 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验

Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验结合使用,用于判断长时间序列数据趋势。Theil-Sen median 趋势分析是一种稳健的非参数计算方法^[27],计算公式为:

$$\beta=\operatorname{median} \frac{x_i-x_j}{i-j} \quad (1)$$

式中: $1<j<i<n$, median 代表所求序列的中位数。 $\beta>0$ 表示“上升或增加趋势”, $\beta<0$ 表示“下降或减少趋势”, $\beta=0$ 表示“趋势不变”。

Mann-Kendall 检验是一种非参数统计检验,不需要样本服从一定的分布,同时也不受少数异常值的干扰,被广泛应用于分析具有水文和气象的时间序列分析中,用于判断时间序列数据是否具有上升或下降

的趋势,计算公式详见文献^[26]。

当 Mann-Kendall 进一步用于检验序列突变时,检验统计量与 Z 值有所差异,通过构造一秩序列再定义统计变量。通过分析统计序列 UB_k , UF_k 可以进一步分析 x 的趋势变化,判断明确突变时间。若 $UF_k>0$,则表明序列呈上升趋势,若 $UF_k<0$,则表明序列呈下降趋势,超过临界值曲线,则表示上升或下降趋势显著^[26]。若 UB_k , UF_k 两曲线出现交点,且处于临界值曲线间,则交点对应的时间点就是突变时间。以上公式通过 IDL 语言和 Matlab 程序代码实现。

2.4 小波分析

Morlet 小波分析方法能够清晰地揭示时间序列中的多种变化,充分反映不同时间尺度下水文气象数据的变化趋势^[28]。与多时间尺度分析方法如移动滤波分析和傅里叶分析相比,小波分析在时域和频域上都具有更好的局部化功能,并且可以对时间序列进行定位分析。本文采用此方法对研究区进行周期分析。

3 结果与分析

3.1 潜在蒸散量时空变化

3.1.1 潜在蒸散量时间变化

(1) 潜在蒸散量年际变化。1960—2019 年黔中地区多年平均潜在蒸散量为 1 004.12 mm,最高值出现在 1963 年,最低值在 2012 年,波动范围为 915.22~1 139.15 mm,极差为 223.93 mm。近 60 a 来年 ET_0 的波动幅度较大,总体呈现波动下降趋势(图 2),线性拟合表明其递减倾向率约为 -6.00 mm/10 a。

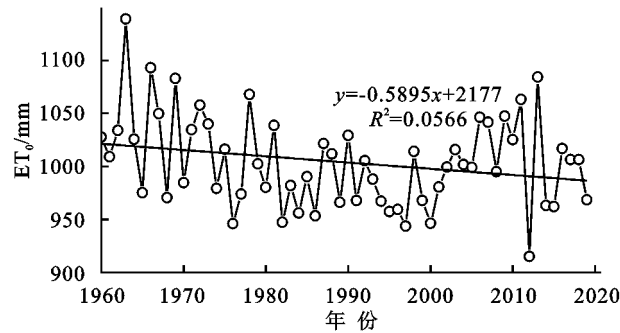


图 2 黔中地区潜在蒸散量年际变化

(2) 潜在蒸散量年代际变化。年代际尺度上年均和季节潜在蒸散量变化见表 1,在 10 a 尺度上,黔中地区潜在蒸散量呈现出“减—减—减—增—减”的波动变化状态趋势,其中 1970s—1990s 一直呈减小趋势;在 2000s 潜在蒸散量出现增加趋势,但在 2010s 又出现减少趋势(图 2),2000s 潜在蒸散量的变化幅度为 2.8%。从各年代的各不同季节上看,秋季和冬季 1970s—1980s 呈减小趋势,1990s—2000s 呈增加趋势,2010s 呈减少趋势。2000s 年代 4 个季节都呈

增加趋势,其中春季上升幅度最大,变化幅度为4.9%。因此,在2000s年代潜在蒸散量呈现明显的增加趋势。春季和夏季1970s—1990s呈减小趋势,2000s年代呈增加趋势。1970s年代春季减小幅度最大,变化幅度为−8.2%;1990s年代夏季减小幅度较大,变化幅度为−4.0%;1980s和2010s年代秋季减小幅度较大,变化幅度为−4.4%;1980s年代冬季减

少幅度最大,变化幅度为−8.0%。从变化幅度上看,四季均呈负值,春季减少趋势最大。从年平均潜在蒸散量来看,整体上呈减小趋势,变化幅度为−0.5%,比上一年代表现下降趋势的年代是1970s,1980s和1990s,其中80年代的变化幅度最大为−2.5%。总体得出,年均潜在蒸散量下降主要原因是由春季和冬季潜在蒸散量的下降导致的。

表1 黔中地区年及季节潜在蒸散量的年代际变化

| 年代 | ET ₀ / (mm·a ^{−1}) | 变幅/ % | 春季 ET ₀ /mm | 变幅/ % | 夏季 ET ₀ /mm | 变幅/ % | 秋季 ET ₀ /mm | 变幅/ % | 冬季 ET ₀ /mm | 变幅/ % |
|-------|---|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|
| 1960s | 1027.62 | — | 308.76 | — | 380.81 | — | 221.20 | — | 129.94 | — |
| 1970s | 1010.38 | −1.7 | 283.50 | −8.2 | 379.84 | −0.3 | 220.03 | −0.5 | 127.01 | −2.3 |
| 1980s | 984.84 | −2.5 | 281.02 | −0.9 | 376.68 | −0.8 | 210.25 | −4.4 | 116.88 | −8.0 |
| 1990s | 980.08 | −0.5 | 278.73 | −0.8 | 361.68 | −4.0 | 218.98 | 4.1 | 120.69 | 3.3 |
| 2000s | 1007.46 | 2.8 | 292.34 | 4.9 | 365.16 | 1.0 | 224.78 | 2.6 | 125.19 | 3.7 |
| 2010s | 1001.24 | −0.6 | 287.85 | −1.5 | 374.24 | 2.5 | 214.82 | −4.4 | 124.33 | −0.7 |
| 平均值 | 1001.94 | −0.5 | 288.70 | −1.3 | 373.07 | −0.3 | 218.34 | −0.5 | 124.01 | −0.8 |

注:“—”代表未发现。

(3) 潜在蒸散量季节变化。图3是黔中地区潜在蒸散量的季节变化,四季整体上呈现减小趋势,下降速率分别为−2.10 mm/10 a, −3.01 mm/10 a, −0.17 mm/10 a, −0.62 mm/10 a。夏季平均潜在蒸散量最大为373.07 mm,约占全年平均的37.16%,其次是春季和秋季,分别为288.17 mm和218.34 mm,占全年平均ET₀

的28.75%和21.75%,冬季平均ET₀为124.01 mm,是四季中最小值,约占年平均ET₀的12.35%。夏春两季潜在蒸散量占全年的65.91%,对全年的潜在蒸散量贡献最大。4个季节的R²都较小,说明下降趋势受到干扰严重,相比较其他季节,夏季的下降趋势略好,但都不够显著,季节变化在年周期上更多地是一种振荡。

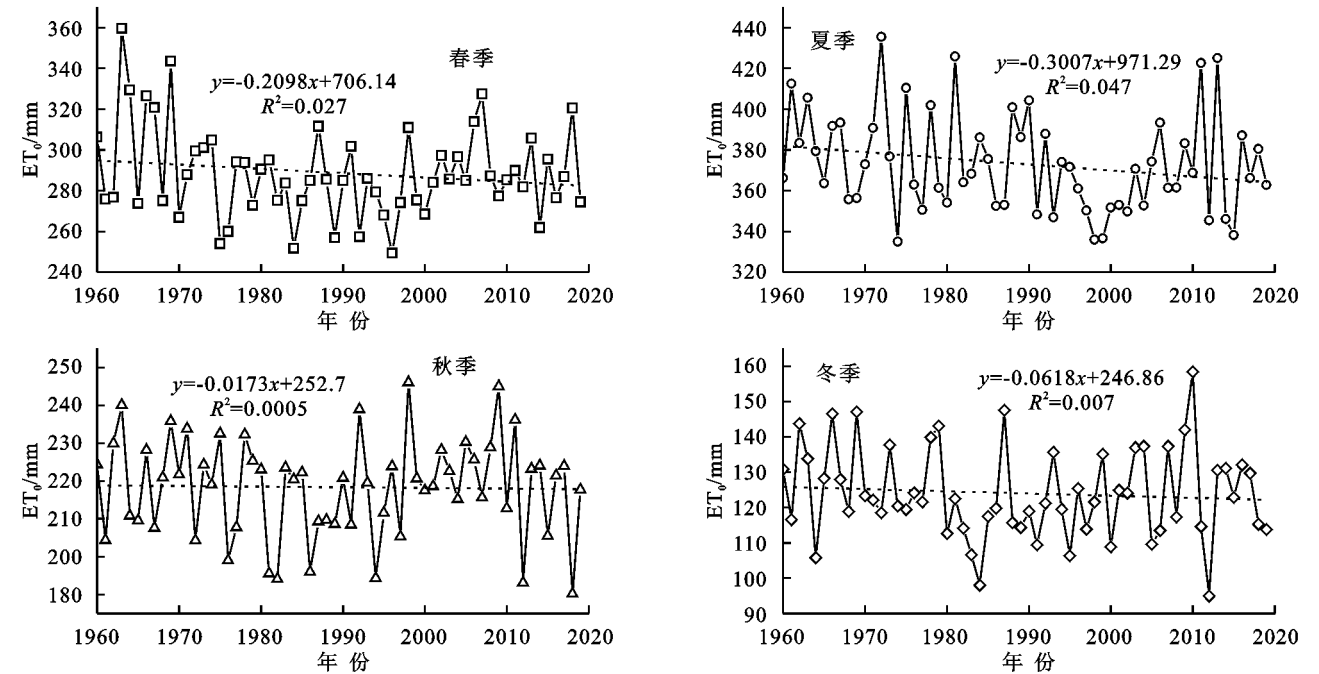


图3 黔中地区潜在蒸散量季节变化

3.1.2 潜在蒸散量空间变化

(1) 年际潜在蒸散量空间变化。图4A显示了黔中地区ET₀的空间分布情况,除南部地区的贵阳站、惠水站和凯里站和北部地区的仁怀站ET₀值较高外,西部地

区毕节站ET₀处于最低值,总体表现为自南向北递减趋势。南部的贵阳、惠水、凯里ET₀在961.20~1 223.10 mm,西部的毕节ET₀为930.50~1 047.00 mm。图4B显示了黔中地区变化趋势的空间分布格

局,地区中部(东南—西北走向)呈下降趋势、地区的南北部分呈现增加趋势。地区东北部的汇川与西南部的安顺、惠水呈上升趋势,其余的站点呈下降趋势。 ET_0 上升的站点仅有 3 个,其中一个站点达到 90% 的显著性水平,其余 2 个站点未达到显著性水平,但呈

小幅度上升趋势。其余的 8 个站点呈下降趋势,6 个站点通过置信度 90% 的显著性检验,2 个站点未通过显著性检验,呈不显著减少变化趋势。贵阳站是下降趋势最大的站点($-16.20\text{ mm}/10\text{ a}$),汇川站是上升趋势最大的站点($6.12\text{ mm}/10\text{ a}$)。

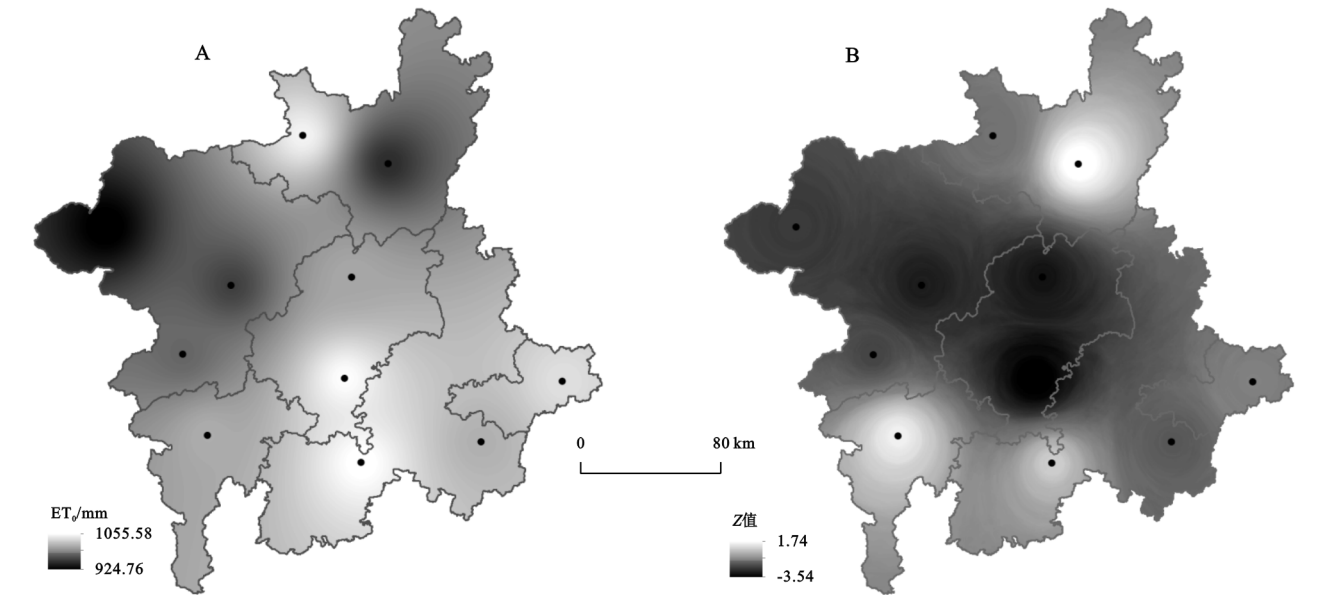


图 4 黔中地区潜在蒸散量与 M-K 趋势 Z 值变化趋势空间分布

(2) 不同季节潜在蒸散量空间变化。春季 ET_0 空间上呈由南向北递减趋势,汇川站与毕节站明显低于其他地区,处于研究区最低值状态(图 5)。其变化趋势呈现东北部和西南部增加、由西北部和东南部向中部递减趋势,3 个站点(汇川、安顺和惠水)通过 90% 的置信度检验,呈不显著增加趋势,3 个站点(贵阳、息烽和黔西)呈显著下降趋势,其余站点均为不显著下降趋势。夏季 ET_0 空间上除北部仁怀 ET_0 高于其他地区,呈由东北部向西南部递减趋势。夏季和秋季 ET_0 变化趋势基本呈现东北部和西南部增加、由东南部向西北部递减趋势。夏季 ET_0 有 3 个站点为不显著上升趋势,中部 4 站点通过 90% 的置信度检验,呈显著下降趋势。秋季 ET_0 空间上呈由东南部向西北部递减趋势。秋季 ET_0 有 1 个站点(汇川)通过 90% 的置信度检验,呈显著上升趋势,其余 8 个站点未通过 90% 显著性检验。冬季 ET_0 空间上呈由南部向北部递减趋势。冬季 ET_0 有 1 个站点(汇川)通过 90% 的置信度检验,呈不显著上升趋势,另 1 个站点(贵阳)通过 90% 显著性检验,呈显著减少趋势。

3.2 潜在蒸散量突变分析

运用 Mann-Kendall 检验法分析黔中地区近 60 a 潜在蒸散量的突变特征,从图 6 可以看出,UF 与 UB 的交点位于 1969 年前后,这意味着黔中地区 ET_0 突变的时间约为 1969 年,在 1969 年以前有 1963 年和 1966 年位于

零分界线以上,说明该时段内 ET_0 处于上升趋势,但在 1969 年以后,黔中地区 UF 统计值小于 0,表明 1969 年以后 ET_0 整体处于下降趋势,在 1984 年 ET_0 下降趋势达到 0.05 显著性水平。对 1969 年前后年潜在蒸散量的计算,发现 1970—2019 年平均潜在蒸散量(996.80 mm)比 1960—1969 年($1\text{ }040.71\text{ mm}$)下降了 43.91 mm 。

3.3 潜在蒸散量周期性变化

为了分析黔中地区 ET_0 的变化周期,利用 Morlet 小波分析对 1960—2019 年的年 ET_0 进行变换,得到小波系数实部等值线图(图 7A)。图中实线表示为取正值的小波系数等值线,即为潜在蒸散量偏高期,虚线表示小波系数取负值的等值线,即为潜在蒸散量偏低期。研究区 ET_0 存在 3 a、9 a、21 a 左右的周期变化,其中 3 a、21 a 周期变化贯穿于 1960—2019 年,而 9 a 周期变化主要存在于 1960—1986 年。从小波系数符号正负相位交替变化过程分析,表明 ET_0 在于 1960—2019 年经历了高一低—高一低—高一低的循环交替过程,1960—1970 年、1982—1993 年、2002—2011 年为 ET_0 偏高期,其余时间段为 ET_0 偏低区,研究结果与 ET_0 的年际变化结果相吻合。

通过小波方差来鉴定对 ET_0 变化规律具有影响力的时间尺度(图 7B),小波方差存在两个明显的波峰,分别是 3 a 和 21 a 的时间尺度上,且在 21 a 的震荡周期最强烈,取得最大值,为强显著周期,第二周期为 3 a。

3.4 潜在蒸散量变化的气象因素识别

通过分析可得出潜在蒸散量与各气象因素的相关性程度(表 2),季节潜在蒸散量、年潜在蒸散量与各气象因素的相关性基本一致。从年尺度上分析,平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、风速和水汽压与 ET_0 呈正相关关系,这些气象因素的增加会导致 ET_0 的增加,且平均气温、最高气温、日照时数、风速和水汽压与 ET_0 的相关性通过了 0.01 水平检验;其中相关性系数最大的是日照时数,然后是风速。相对湿度和降水量与 ET_0 呈负相关关系,这些气象因素

的增加会导致 ET_0 的减少;这两个气象因素与 ET_0 都在 0.01 水平上显著相关。从气象因素的年变化趋势来看(图 8),风速、相对湿度、降水量和日照时数均呈下降趋势,其气候变化率分别为 $-0.03\text{ (m/s)}/10\text{ a}$, $-0.15\%/10\text{ a}$, $-5.97\text{ mm}/10\text{ a}$, $-46.44\text{ h}/10\text{ a}$,其中日照时数的变化对 ET_0 的下降趋势影响最大,其次是风速。虽然平均气温呈上升趋势,变化率为 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,其在时段内变化相比其他气象因素而言不显著。因此,在年尺度上,日照时数和风速是影响 ET_0 发生变化的主导气象因素。

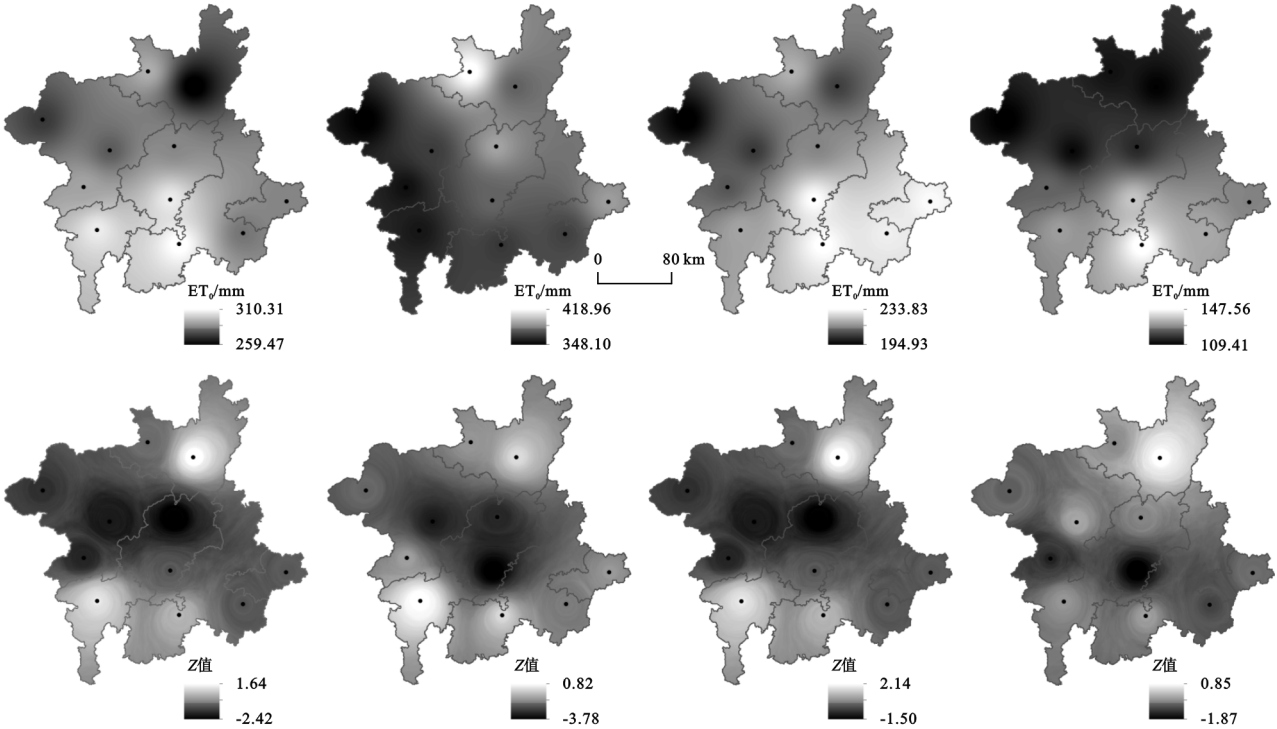


图 5 黔中地区四季潜在蒸散量与 M-K 趋势 Z 值变化趋势空间分布

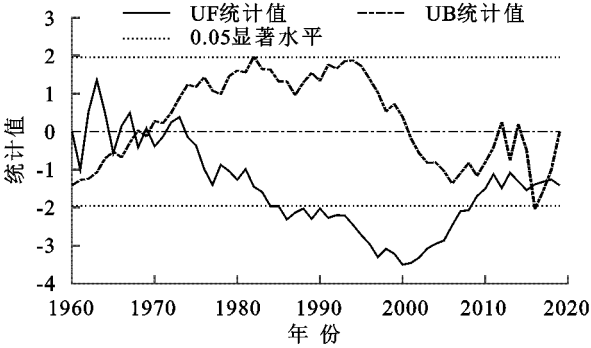


图 6 黔中地区年潜在蒸散量 Mann-Kendall 检验

季节尺度上具有与年特征相似性,平均气温、最高气温、日照时数和风速在四季上都与 ET_0 呈现正相关关系,相反的,相对湿度、降水量都和 ET_0 呈负相关关系。四季中,日照时数与 ET_0 的相关性最高,均达到了 0.01 的正显著性水平。春季,潜在蒸散量呈下降趋势。平均气温、最高气温、日照时数和风速与 ET_0 呈显著正相关关系,而最低气温、相对湿度、水汽

压和降水量呈负相关关系。其中呈正相关性最大的日照时数和风速呈下降趋势,变化率分别为 $-11.60\text{ h}/10\text{ a}$, $-0.07\text{ (m/s)}/10\text{ a}$,虽然气温呈上升趋势,降水量处于下降趋势,为 $-6.56\text{ mm}/10\text{ a}$,也没有改变 ET_0 的下降。因此,导致春季 ET_0 下降的主要原因是日照时数、风速,其次才是降水量。夏季,日照时数、风速与 ET_0 呈正相关关系,相对湿度、降水量与 ET_0 呈负相关关系。日照时数变化率为 $-20.47\text{ h}/10\text{ a}$,其变化率较大,日照时数与风速的显著减少是夏季 ET_0 下降的原因。秋季,平均气温、最高气温、日照时数与风速与 ET_0 呈正相关关系,其中,平均气温、最高气温呈上升趋势,其余呈下降趋势,日照时数与降水量下降趋势较大,分别为 $-7.55\text{ h}/10\text{ a}$, $-5.45\text{ mm}/10\text{ a}$,这两个因素是影响 ET_0 下降的主要因子。冬季,日照时数和风速与 ET_0 呈正相关关系,均达到显著性水平,且都是呈下降趋势。相对湿度、水汽压和降水量与 ET_0 呈负相关关系,冬季

气温较低,且日照时数较少,整个地区蒸发微弱,因此,这是导致 ET_0 减少的最大原因。

综上所述,在年尺度和季节尺度上各个气象因素

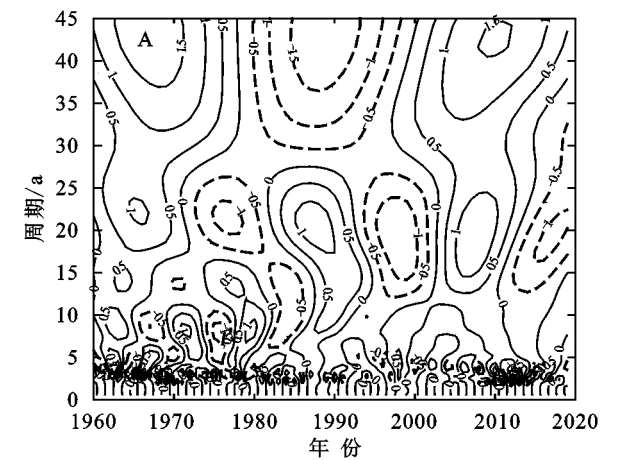


图 7 黔中地区潜在蒸散量小波分析与小波方差

表 2 黔中地区年及季节潜在蒸散量与气象因素相关性分析

| 季节 | 平均气温 | 最高气温 | 最低气温 | 日照时数 | 风速 | 相对湿度 | 水汽压 | 降水量 |
|----|---------|---------|-------|---------|---------|----------|---------|----------|
| 春季 | 0.49 ** | 0.36 ** | −0.04 | 0.83 ** | 0.62 ** | −0.76 ** | −0.08 | −0.46 ** |
| 夏季 | 0.79 ** | 0.63 ** | −0.02 | 0.92 ** | 0.70 ** | −0.81 ** | 0.43 ** | −0.12 |
| 秋季 | 0.67 ** | 0.57 ** | −0.08 | 0.92 ** | 0.65 ** | −0.84 ** | −0.25 | −0.76 ** |
| 冬季 | 0.44 ** | 0.57 ** | 0.02 | 0.85 ** | 0.28 * | −0.77 ** | −0.04 | −0.46 ** |
| 全年 | 0.70 ** | 0.71 ** | 0.23 | 0.83 ** | 0.56 ** | −0.80 ** | 0.40 ** | −0.39 ** |

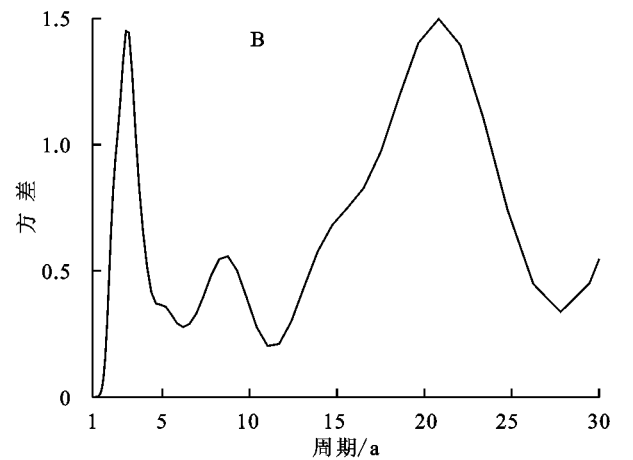
注: ** 表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著; * 表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

4 讨论

潜在蒸散量作为一项重要的农业与水文变量,对区域灌溉排水工程设计、流域规划具有指导意义^[4]。空气动力学、辐射、下垫面条件等对潜在蒸散量产生不同程度影响^[29],据已有研究表明^[17],潜在蒸散量受气温、降水、风速、相对湿度、日照时数等综合气象因素直接影响。气温的升高与降水量的减少可能会导致不同程度的干旱,近年来西南地区的干旱较为频繁^[26],特别是 2009 年的西南大旱,对整个黔中地区的农业、人口等经济造成巨大损失。全球变暖和厄尔尼诺现象的加剧导致海面温度异常,降水少,雨季提前结束,最终导致气温高,降水更少^[30]。过去 50 a 的全球气温变化率为 0.13℃/10 a,黔中地区的气温增长率低于全球气温上升速率,为 0.09℃/10 a。黔中地区的日照时数、风速和相对湿度减少,这与中国大部分地区变化相一致^[8,31],但是区域空间下存在异质性。气候特征的变化将改变或已改变黔中地区的水文循环,这将导致更频繁的干旱和洪水,水资源的合理配置对整个地区的农业发展、生态环境保护和经济协调发展等产生积极的意义。

黔中地区近 60 a 的平均气温显著上升,但是潜在蒸散量显著减少,说明黔中地区存在“蒸发悖论”,

与 ET_0 的变化分析均存在差异,是气象因素共同作用的结果。黔中地区年 ET_0 的减小的主要气象因素是日照时数的减少,其次为风速。



这与学者在研究西南地区潜在蒸散量的变化分析结果相同^[26]。黔中地区气温升高和湿度降低可能会导致 ET_0 的增加,但其影响 ET_0 变化的主要气象因素是日照时数和风速,最终导致黔中地区的“蒸发悖论”。但是,除气象因素的影响外,潜在蒸散量在不同下垫面环境条件下的“蒸发悖论”是否存在差异,其研究结果将影响主导因素的识别,是下一步开展研究的重点,研究结果可为黔中地区的灌溉管理、水文过程和抗旱减灾提供科学依据,

5 结论

(1) 1960—2019 年黔中地区潜在蒸散量呈显著下降趋势,其递减倾向率约为 −6.00 mm/10 a。四季潜在蒸散量整体上呈减小趋势,夏春两季潜在蒸散量占全年的 65.91%,是影响年潜在蒸散量下降的主要原因。

(2) 黔中地区潜在蒸散量空间分布特征呈自南向北递减趋势,其变化趋势在地区中部(东南—西北走向)呈下降趋势、在地区的南北部分呈现增加趋势。

(3) 黔中地区潜在蒸散量在 1969 年左右发生一次明显的减少突变,1970—2019 年平均潜在蒸散量(996.80 mm)比 1960—1969 年(1 040.71 mm)下降了 43.91 mm。从小波分析结果可得,研究区潜在蒸

散量存在 3 a, 9 a, 21 a 的左右的周期变化, 其中 3 a, 21 a 周期变化贯穿于 1960—2019 年, 而 9 a 周期变

化主要在 1960—1986 年, 且在 21 a 的震荡周期最强烈为主周期。

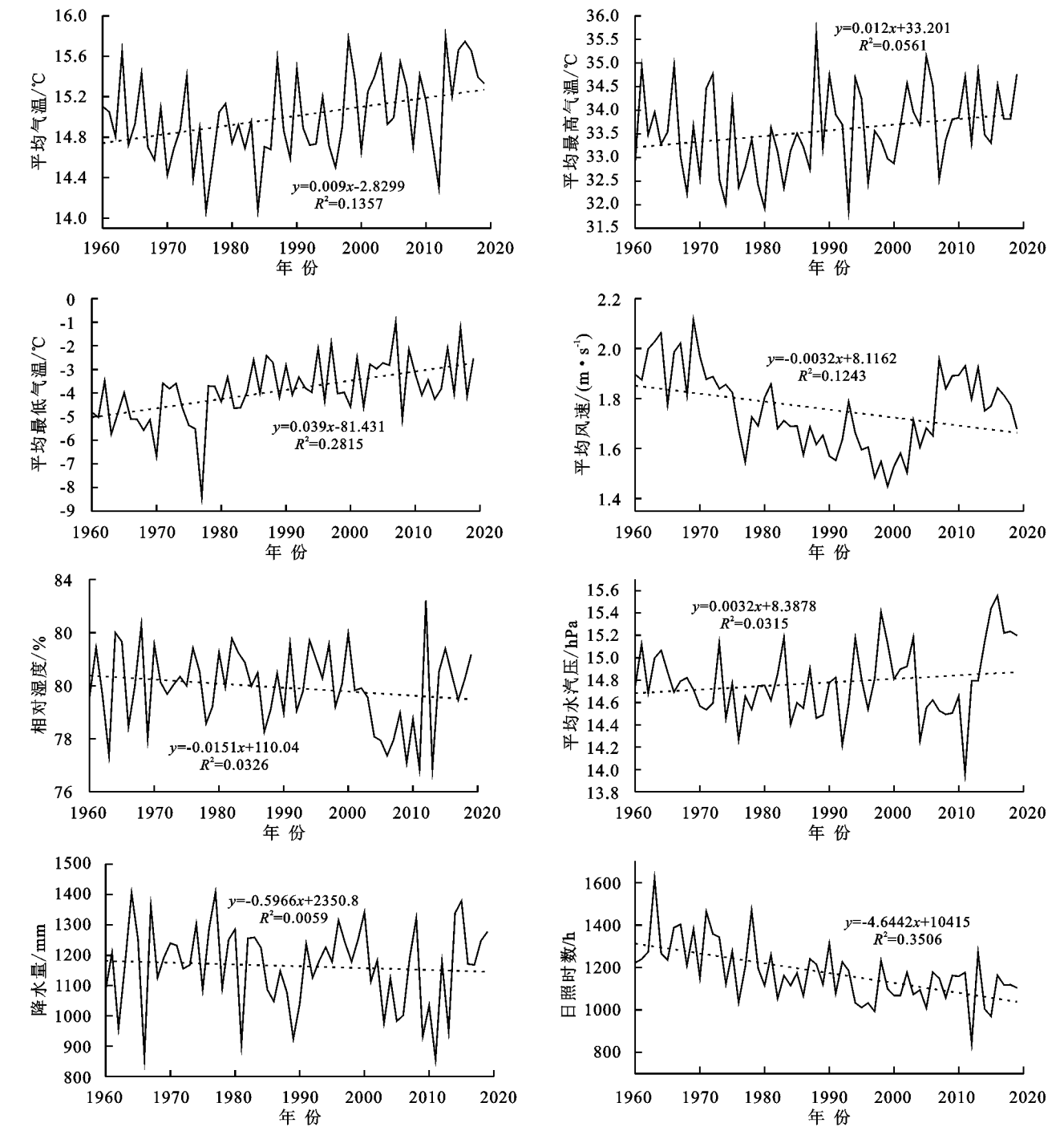


图 8 黔中地区气象因素变化趋势

(4) 黔中地区平均气温、最高、最低气温呈显著上升趋势, 而平均风速、相对湿度、降水量与日照时数呈显著下降趋势, 研究区存在“蒸发悖论”现象。其中日照时数是影响潜在蒸散量变化的主要气象因素, 其次是风速, 且各气象因素在季节上对潜在蒸散量影响存在差异性。

参考文献:

[1] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements,

FAO Irrigation and Drainage Paper 56[R]. Rome: FAO, 1998.
[2] Mcvicar T. Spatially distributing 21 years of monthly hydrometeorological data in China: spatio-temporal analysis of FAO-56 crop reference evapotranspiration and pan evaporation in the context of climate change[R] // CSIRO Land and Water Technical Report 8-05, Canberra, Australia, 2005.
[3] Bandyopadhyay A, Bhadra A, Raghuwanshi N S, et al. Temporal trends in estimates of reference evapotranspi-

- ration over India[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(5): 508-515.
- [4] Jhajharia D, Singh V P, Kumar R, et al. Searching evidence for the existence of evaporation paradox in arid environments of northwest India[J]. *Global Nest Journal*, 2014, 16(1): 1-9.
 - [5] Tong J, Fischer T, Lu X. Larger Asian rivers: Climate change, river flow, and watershed management [J]. *Quaternary International*, 2010, 226(1/2): 1-3.
 - [6] Li B, Chen F, Guo H. Regional complexity in trends of potential evapotranspiration and its driving factors in the Upper Mekong River Basin[J]. *Quaternary International*, 2015, 380/381: 83-94.
 - [7] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. *Ence.*, 2002, 298: 1410-1411.
 - [8] Wang Z L, Xie P W, Lai C G, et al. Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and contributing climatic factors in China during 1961—2013 [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 544: 97-108.
 - [9] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation Losing Its Strength[J]. *Nature*, 1995, 377(6551): 687-688.
 - [10] Irmak S, Kabenge I, Skaggs K E, et al. Trend and magnitude of changes in climate variables and reference evapotranspiration over 116-yr period in the Platte River Basin, central Nebraska—USA [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420: 228-244.
 - [11] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s[J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(15): 2031-2039.
 - [12] Tebakari T, Yoshitani J, Suvanpimol C. Time-space trend analysis in Pan evaporation over Kingdom of Thailand [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2005, 10(3): 205-215.
 - [13] Tabari H, Hosseinzadeh P, Shifteh B, et al. Possible influences of North Atlantic Oscillation on winter reference evapotranspiration in Iran[J]. *Global & Planetary Change*, 2014, 117: 28-39.
 - [14] Huntington T G, Billmire M. Trends in precipitation, runoff, and evapotranspiration for rivers draining to the gulf of maine in the United States[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(2): 726-743.
 - [15] Charles O. Statistical analyses of potential evapotranspiration changes over the period 1930—2012 in the Nile River riparian countries[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2016, 226/227: 80-95.
 - [16] Chongyu X, Le G, Tong J, et al. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 327(1/2): 81-93.
 - [17] 温姗姗, 姜彤, 李修仓, 等. 1961—2010 年松花江流域实际蒸散发时空变化及影响要素分析[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(2): 79-86.
 - [18] Yang J Y, Liu Q, Mei X R, et al. Spatiotemporal characteristics of reference evapotranspiration and its sensitivity coefficients to climate factors in Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013 12(12): 2280-2291.
 - [19] Mo X, Chen X, Shi H, et al. Attributing regional trends of evapotranspiration and gross primary productivity with remote sensing: a case study in the North China Plain[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(1): 295-310.
 - [20] Zhou G Y, Liao J S, Liu W, et al. 50-year evapotranspiration declining and potential causations in subtropical Guangdong province, southern China[J]. *Catena*, 2015, 128: 185-194.
 - [21] Dong Q, Wang W, Shao Q, et al. The response of reference evapotranspiration to climate change in Xinjiang, China: Historical changes, driving forces, and future projections[J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(1): 235-254.
 - [22] 曹建华, 蒋忠诚, 袁道先, 等. 岩溶动力系统与全球变化研究进展[J]. *中国地质*, 2017, 44(5): 874-900.
 - [23] 李忆平, 王劲松, 李耀辉. 2009—2010 年中国西南区域性大旱的特征分析[J]. *干旱气象*, 2015, 33(4): 537-545.
 - [24] 王璐瑶. 黔中城市群发展规划印发实施[N]. *贵州日报*, 2017-03-17(2).
 - [25] 贵州省地质矿产局. 贵州省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
 - [26] Feng Y, Cui N, Zhao L, et al. Spatiotemporal variation of reference evapotranspiration during 1954—2013 in Southwest China [J]. *Quaternary International*, 2017, 441: 129-139.
 - [27] Fu G, Chen S, Liu C, et al. Hydro-Climatic trends of the yellow river basin for the last 50 years[J]. *Climatic Change*, 2004, 65(1): 149-178.
 - [28] 任秀真, 徐光来, 刘永婷, 等. 安徽省近 56 年气候要素时空演变特征[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(5): 287-294.
 - [29] Li X C, Jiang T, Shan Wen S S, et al. Spatio-temporal variation of actual evapotranspiration and its impact factors in the Pearl River Basin, China[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 30(3): 483-494.
 - [30] Yin Y, Wu S, Gang C, et al. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 101(1): 19-28.
 - [31] 郭小娇, 龚晓萍, 石建省, 等. 典型岩溶区潜在蒸散发变化及其影响因素[J]. *地质学报*, 2019, 93(12): 3269-3281.