

贵州清镇蒸发量变化特征及其影响因素分析

金昭贵¹ 滕万里¹ 吴智凤² 杨涛³ 刘梅³ 张皓¹ 李娟¹¹

(1. 清镇市气象局, 贵州 清镇 551400;

2. 修文县第一中学, 贵州 修文 550299;

3. 贵阳市气象局, 贵州 贵阳 550006)

【摘要】: 蒸发量变化特征及影响因素研究具有重要的现实意义。本文选取贵州清镇 1970—2019 年蒸发量、气温、日照百分率等气象资料, 利用气候倾向率、M-K 检验、Morlet 小波分析等方法对贵州清镇蒸发量变化特征及其影响因素进行分析, 结果表明: 贵州清镇月蒸发量呈“M”型特征, 春季、夏季、秋季、冬季、年及年代蒸发量均呈减少趋势, 各季节、年蒸发量都发生了突变, 各季节、年蒸发量分别存在 4 类不同时间尺度的小波周期变化特征。蒸发量变化受气温、气温日较差、日照百分率、低云量、相对湿度、风速等因素共同影响。

【关键词】: 贵州清镇 蒸发量 小波分析 M-K 检验

【中图分类号】: P426 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1003-6563(2022)03-0068-07

近年来, 蒸发量变化研究已成为国内外学者关注的热点之一^[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11], 作为地表热量平衡和水量平衡的重要组成部分, 蒸发量与地表水量平衡、能量平衡关系密切, 是水循环和能量循环的关键环节, 对人类的生产、生活产生影响。此外, 蒸发量在估算陆地蒸发、作物需水和作物水平衡等方面具有十分重要的应用价值, 对农业生产发展、水资源的合理利用、生态建设等方面具有重要意义。

目前, 国内外很多学者已开展了蒸发量变化方面的研究, 发现蒸发量在全球^[1,2,3,4,5]、北半球均存在明显减少趋势^[6,7,8,9,10], 这一事实与全球变暖可能导致蒸发增加的猜测相矛盾, 即蒸发悖反现象^[9], 由此引发了诸多关于蒸发量变化趋势及其原因分析相关探索^[10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20], 发现蒸发量变化受相关气象要素综合影响。在中国大部分地区, 蒸发量呈下降趋势^[10,11,15,16], 蒸发量的变化与日照百分率、太阳总辐射、风速等关系密切, 是蒸发量减少的影响因子。左洪超等^[10]认为蒸发量与大气相对湿度相关性最好, 蒸发量在空间上变化以华东和中南地区最明显, 长江流域蒸发量中下游地区比上游地区下降趋势显著, 太阳净辐射和风速的显著下降影响蒸发量下降^[19]。研究也发现, 黄河流域蒸发量存在减少趋势^[13,14], 风速和太阳辐射是影响因素。前人^[12]对贵州 1961—2001 年蒸发量进行研究发现, 蒸发量呈下降趋势, 太阳净辐射是重要影响因素之一。

贵州清镇属黔中地区, 位于贵阳市西部, 属亚热带季风湿润气候。境内红枫湖、东风湖、索风湖座落其间, 有干流鸭池河和支流猫跳河、暗流河等 10 条河流。受地质、地貌、气候、水文等自然因素的影响, 加上人类开发活动, 致使自然灾害频繁, 严

作者简介: 金昭贵 (1983-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事气候变化研究、综合气象业务等工作。刘梅 (1982-), 女, 本科, 高级工程师, 主要从事综合气象工作。

基金项目: 贵州省气象局科研业务项目 (黔气科登[2021]01-19 号); 贵阳市气象局气象科研业务项目 (合同编号: 筑气科合 YW[2021]02 号)

重影响该地区经济社会发展。目前,针对贵州清镇蒸发量变化特征及影响因素的研究尚少,因此对该地区蒸发量变化特征及其影响因素进行研究具有重要的现实意义。本次选取贵州清镇 1970—2019 年蒸发量为研究对象,对蒸发量变化特征及其影响因素进行全面分析,以期了解该地区蒸发量的变化规律及其影响因素,为该地区应对气候变化、农业发展、水资源开发利用、生态建设与保护等提供科学参考依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文选取 1970—2019 年贵州清镇国家气象观测站逐月蒸发量、气温、水汽压、日照百分率、相对湿度、风速、降水、云量等气象资料,资料由贵州省气象局信息中心提供。研究资料通过加权和均一化处理,建立逐月、逐年时序数据。按 12 月至次年 2 月为冬季、3 月至 5 月为春季、6 月至 8 月为夏季、9 月至 11 月为秋季生成逐季序列。20cm 口径小型蒸发器与 E-601B 蒸发器蒸发量折算参照文献[22]计算。

1.2 研究方法

本文应用气候趋势系数和气候倾向率方法分析贵州清镇蒸发量的月、季节、年变化趋势^[23],采用 Mann-Kendall 突变检验方法^[24]进行异常年份的气候突变检验,运用 Morlet 小波分析^[21,23]进行季、年蒸发量变化周期分析。利用 Spass22 等软件对蒸发量的影响因素进行相关分析、主成分等分析。

2 结果与讨论

2.1 蒸发量月变化特征

由图 1 可知,贵州清镇蒸发量逐月变化呈“M”型特征,蒸发量最小值出现在 1 月,12 月次之;最大值出现在 7 月,8 月次之。1 月至 5 月蒸发量呈上升趋势,5 月达到峰值,增幅达 27.48mm/月,直到 6 月逐渐减少,7 月达到最大值,7 月之后呈减少趋势,幅度达 28.16mm/月。其中 4 月至 9 月的蒸发量在 880mm 以上,合计占全年蒸发量 2/3 以上;6 月至 8 月蒸发量在 486.2mm,合计占全年蒸发量的 38%。

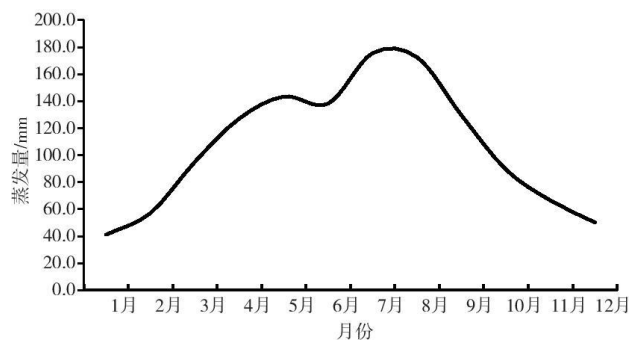


图 1 贵州清镇蒸发量月变化统计

2.2 蒸发量季节变化特征

2.2.1 蒸发量季节变化趋势分析

通过统计显示,贵州清镇季节蒸发量分别为春季 366.0mm、夏季 486.0mm、秋季 286.1mm 和冬季 148.6mm。由图 2 可见,4 个季节的蒸发量均呈减少趋势,减少程度不一,夏季减少趋势最为明显,其次是春季,冬季、秋季依次减少,减少趋势分别为 24.4mm/10a、16.04mm/10a、9.0mm/10a、7.5mm/10a。蒸发量的减少趋势春季、夏季表现得较显著,并通过了 0.01 水平的显著性检验。春季和夏季蒸发量占全年蒸发量的 66.2%,表明春、夏两季蒸发是全年蒸发的主要贡献因子,春季和夏季的蒸发对水循环有重要的作用。

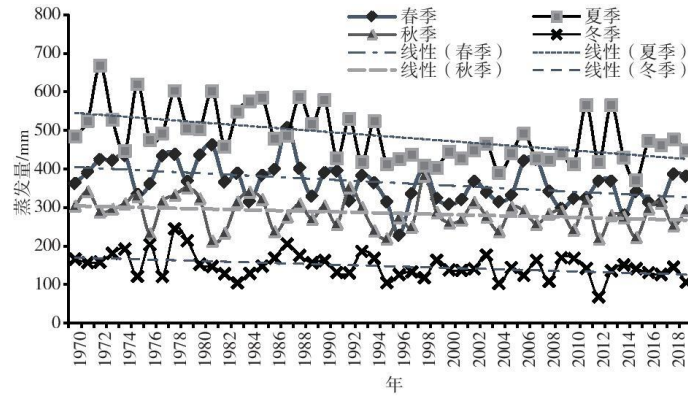


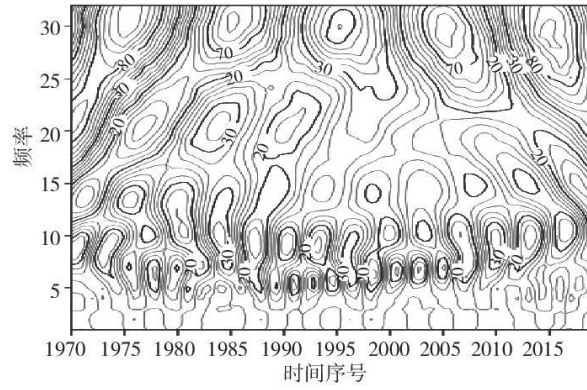
图 2 贵州清镇蒸发量季节蒸发量年际变化

2.2.2 蒸发量季节变化突变分析

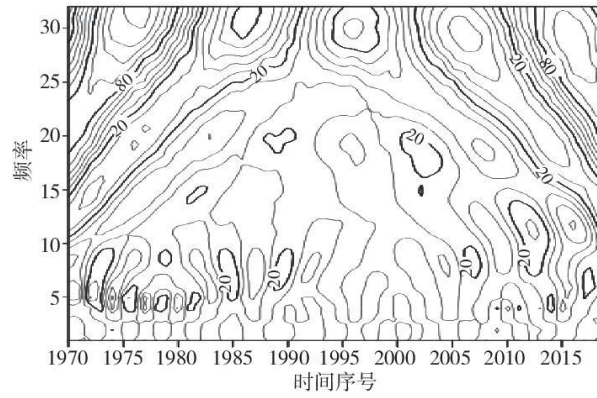
运用 M-K 方法对贵州清镇蒸发量四季进行突变分析,取 95%置信度水平,结果显示(图略),春季蒸发量 UF、UB 曲线存在 1 个交点,通过 $\alpha=0.05$ 的检验,在 1992 年前后发生突变。夏季蒸发量 UF、UB 曲线存在 1 个交点,突变发生在 1991 年前后。秋季蒸发量 UF、UB 曲线存在 1 个交点,在 1988 年前后发生突变。冬季蒸发量 UF、UB 曲线存在 5 个交点,分别在 1989、1993、1995、2008、2012 年前后发生了转折突变。

2.2.3 蒸发量季节变化小波分析

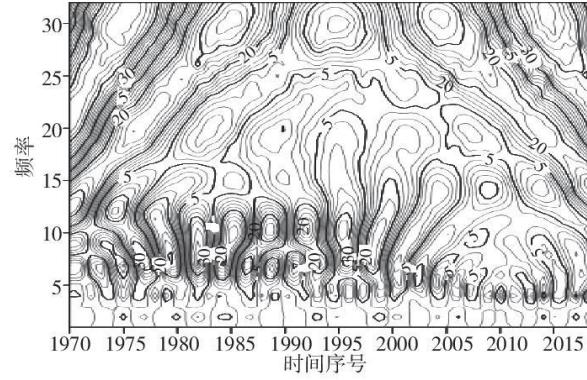
在对季节蒸发量序列进行量化基础上,为进一步消除边界效应,采用对称延展法对量化后的季节蒸发量序列进行了前后 10 年的延展,然后采用复数 Morlet1~1.5 小波进行小波变换分析。由图 3(a)可见,春季蒸发量存在 7~10、11~15、15~23、24~32 年 4 类尺度的周期变化规律。其中,24~32 年时间尺度存在 5 次震荡;7~10 年时间尺度表现较强,正负位相交替出现,在研究时段具有全域性;15~23 年时间尺度的周期变化在 20 世纪 90 年代至 21 世纪 10 年代,表现较为稳定;而 3~6 年尺度的变化整体表现较为稳定。30 年是主周期,14 年是次周期,10 年是第 3 周期,5 年是第 4 周期。由图 3(b)可知,夏季蒸发量存在 4~10、11~18、18~24 及 24~29 年 4 类尺度的周期变化规律。其中,24~29 年时间尺度存在 5 次震荡;11~18、18~24 年时间尺度表现稳定,在研究时段表征为全域性;在 4~10 年时间尺度的变化在 20 世纪 90 年代至 2005 年表现较为稳定;而 1~3 年尺度的周期变化整体表现稳定。29 年是主周期,19 年是次周期,12 年是第 3 周期,6 年是第 4 周期。图 3(c)显示,秋季蒸发量存在 4~11、11~15、15~19、24~32 年 4 类尺度的周期变化规律。其中,24~32 年时间尺度存在 3 次震荡;在 4~11 年时间尺度正负位相交替出现,11~15、15~19 年时间尺度在研究时段具有全域性;而 1~3 年尺度的变化表现较为稳定。31 年是主周期,13 年是次周期,7 年是第 3 周期,4 年是第 4 周期。由图 3(d)可知,冬季蒸发量存在 3~7、7~10、11~17、17~25、28~32 年 5 类尺度的周期变化规律。其中,17~25 年时间尺度表现较强,存在 2 次震荡;在 4~11 年时间尺度正负位相交替出现,7~10 年时间尺度在 20 世纪 80 年代至 90 年代、21 世纪初至 2010 年表现稳定,11~17 年时间尺度在 20 世纪 90 年代后表现稳定,28~32 年时间尺度出现 1 次震荡;而 1~2 年时间尺度的周期变化整体表现较为稳定。31 年是主周期,20 年是次周期,13 年是第 3 周期,10 年是第 4 周期,3 年是第 5 周期。



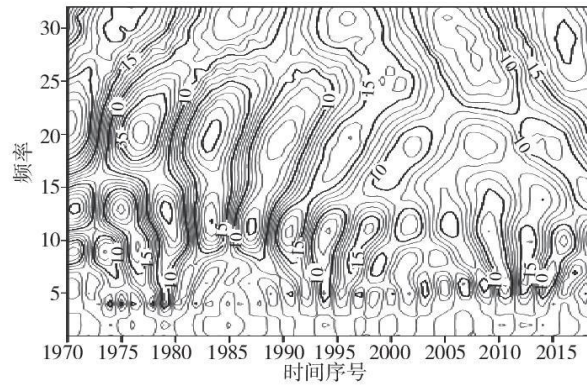
(a) 春季



(b) 夏季



(c) 秋季



(d) 冬季

图3 贵州清镇春、夏、秋、冬季蒸发量小波实部分析

2.3 蒸发量年际年代变化趋势分析

由图4可知，贵州清镇年蒸发量呈下降趋势，气候变化率为57.86mm/10a，偏多年和偏少年交替出现，1978年蒸发量最大，达1599.8mm，最少是1995年，为1057.2mm，两者相差近542.6mm。与历年平均相比，有26年低于平均值，其余年份高于平均值。运用M-K方法对年蒸发量进行突变分析，取95%置信度水平。由图5可见，UF、UB曲线存在1个交点，通过 $\alpha=0.05$ 的检验，年蒸发量在1990年前后发生突变。

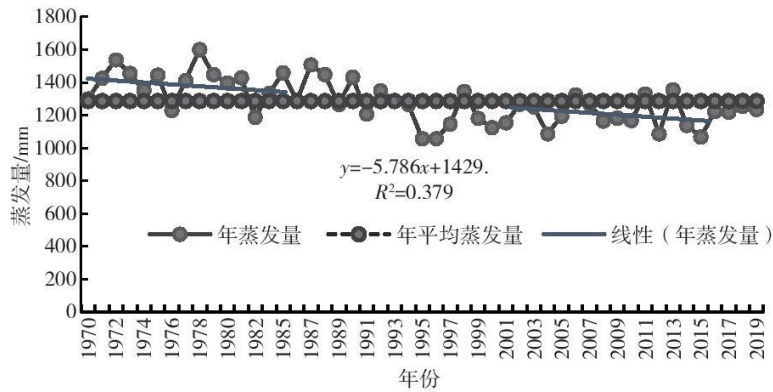


图4 贵州清镇蒸发量年际变化趋势

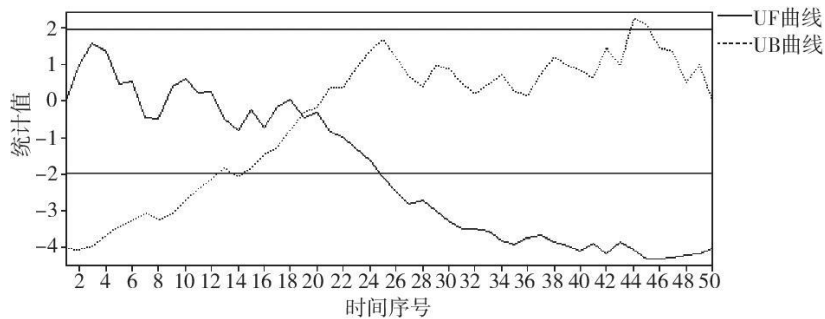


图5 贵州清镇M-K突变分析

在对逐年蒸发量序列进行量化基础上,为进一步消除边界效应,采用对称延展法对经量化后的序列进行了前后10年的延展,然后采用复数Morlet1-1.5小波进行小波变换分析,由图6可知,年蒸发量的波动过程中存在的多时间尺度特征。总的来说,蒸发量存在着11~15、15~18、18~25及25~32年的4类尺度的周期变化规律。其中,25~32年时间尺度表现明显,存在5次震荡;在18~25年时间尺度表现较强,主要发生在20世纪70年代至90年代,正负位相交替出现;在15~18年时间尺度的周期变化在研究时段表现非常稳定,具有全域性;而3~6年尺度的变化在1990年以前表现较为稳定。30年是主周期,20年是次周期,13年是第3周期,4年是第4周期。

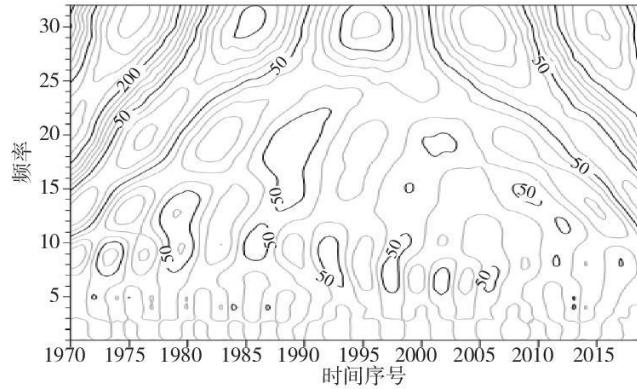


图 6 贵州清镇蒸发量年变化小波实部分析

由图 7 可知，年代蒸发量呈下降趋势，气候变化率为 59.08mm/10a。70 年代蒸发量为最大值，高出平均值达 133.9mm/10a。其中，1978 年和 1972 年的蒸发量为近 50 年的最高值和次高值，分别高出平均值 313.4mm 和 250.7mm。00 年代蒸发量为最低值，低于平均值 84.1mm/10a。80 年代蒸发量有两年低于平均值，90 年代有 6 年低于平均值，00 年代均低于平均值，而 10 年代仅有 2 年蒸发量高于平均值。

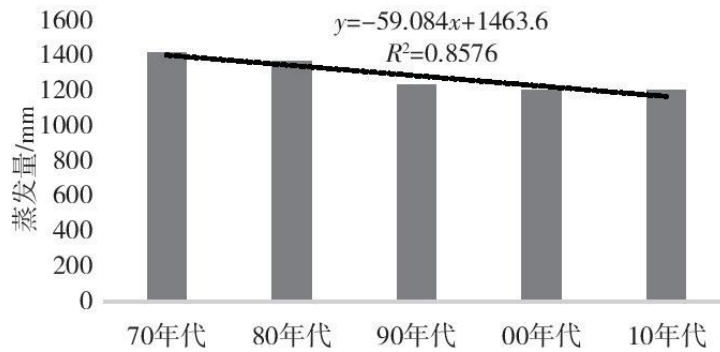


图 7 贵州清镇蒸发量年代变化

3 蒸发量影响因素分析

3.1 蒸发量影响因子变化趋势

据前人对蒸发量影响因素的研究^[12]，将影响蒸发量的因素归类为能量供给因子、湿度因子和空气动力因子，本次统计贵州清镇 1970—2019 年蒸发量影响因子，分别计算各影响因子的变化趋势。从表 1 可知，能量供给因子中的温度日较差、日照百分率呈下降趋势，平均温度、最高气温、最低气温、低云量呈上升趋势；湿度因子中水汽压呈显著上升趋势，相对湿度、降水量呈下降趋势，空气动力因子风速呈显著下降趋势。

表 1 贵州清镇 1970—2019 年蒸发量与各气候要素的相关及其变化趋势

影响因子	气象要素	相关系数	自身变化趋势
------	------	------	--------

能量因子	平均气温	-0.294	上升
	最高气温	-0.137	上升
	最低气温	-0.466**	上升
	气温日较差	0.292	下降
	低云量	-0.519**	上升**
	日照百分率	0.277	下降
湿度因子	降水量	0.059	下降
	相对湿度	-0.035	下降
	水汽压	-0.390**	上升**
动力因子	风速	0.507**	下降**

注：**代表通过 $p=0.01$ 检验，*代表通过 $p=0.05$ 检验。

3.2 蒸发量影响因子相关分析

由表 2 可见，年蒸发量影响因素能量因子中最低气温、低云量与蒸发量呈显著负相关，与日照百分率呈显著正相关；湿度因子中水汽压与蒸发量呈显著负相关，动力因子风速与年蒸发量呈显著正相关。春季能量因子中平均气温、最高气温、气温日较差、日照百分率与蒸发量呈显著正相关，低云量与蒸发量呈显著负相关，湿度因子相对湿度与蒸发量呈显著负相关，动力因子风速与蒸发量呈显著正相关。夏季能量因子中平均气温、最高气温、气温日较差、日照百分率与蒸发量呈显著正相关，低云量与蒸发量呈显著负相关，湿度因子降水量、相对湿度、水汽压与蒸发量呈显著负相关，动力因子风速与蒸发量呈显著正相关。秋季能量因子中最高气温、气温日较差、日照百分率与蒸发量呈显著正相关，低云量与蒸发量呈显著负相关，湿度因子相对湿度与蒸发量呈显著负相关，动力因子风速与蒸发量呈显著正相关，未通过显著性检验。冬季能量因子中平均气温、最高气温、最低气温、气温日较差、日照百分率与蒸发量呈显著正相关，低云量与蒸发量呈显著负相关，湿度因子降水量、相对湿度与蒸发量呈显著负相关，动力因子风速与蒸发量呈显著正相关。由以上分析可知，贵州清镇相关气象要素与蒸发量有着密切的相关性，蒸发量变化受多种气象要素的综合影响。然而，影响蒸发量的影响要素不限于本次选取的影响要素，相关影响要素的研究还需进一步开展研究。

表 2 贵州清镇蒸发量与各影响因子相关系数

季节	能量因子						湿度因子			动力因子
	平均气温	最高气温	最低气温	气温日较差	低云量	日照百分率	降水量	相对湿度	水汽压	风速
春季	0.405**	0.521**	0.208	0.689**	-0.647**	0.662**	-0.147	-0.507**	-0.002	0.399**
夏季	0.436**	0.599**	-0.139	0.762**	-0.722**	0.734**	-0.410**	-0.636**	-0.418**	0.513**
秋季	0.229	0.476**	-0.062	0.692**	-0.659**	0.759**	-0.076	-0.613**	-0.271	0.127

冬季	0.567**	0.701**	0.373*	0.831**	-0.663**	0.842**	-0.551**	-0.601**	0.256	0.373*
年	-0.294	-0.137	-0.466**	0.292	-0.519**	0.277**	0.059	-0.035	-0.390**	0.507**

注：**代表通过 $p=0.01$ 检验，*代表通过 $p=0.05$ 检验。

3.3 蒸发量影响因子主成分分析

选择通过相关显著性检验的蒸发量影响因子数据进行标准化处理后做主成分分析，结果表明，年影响因素 KMO 为 $0.763 > 0.7$, Bartlett 球形检定显著性 $p=0.000$, 3 个成分特征值分别为 4.15、2.785、1.244, 均大于 1, 且累计贡献率=81.80%, 可以提取 3 个因子。分析因子载荷显示 3 个主成分, 影响因素平均气温、最高气温、最低气温在成分 1 上有较高载荷, 气温日较差、日照百分率、低云量在成分 2 上有较高载荷, 相对湿度、风速在成分 3 上有较高载荷。

4 结论

本文选取贵州清镇 1970—2019 年蒸发量等气象资料, 对蒸发量的变化特征及其影响因素进行全面研究分析, 对该区应对气候变化、农业发展、水资源的合理开发利用、生态建设与保护等具有重要的现实意义。

(1) 贵州清镇蒸发量月变化呈“M”型特征, 蒸发量最小值出现在 1 月, 12 月次之; 最大值出现在 7 月, 8 月次之。4 月至 9 月的蒸发量在 880mm 以上, 占全年蒸发量的 2/3 以上; 6 月至 8 月蒸发量在 486.2mm, 占全年蒸发量的 38%。

(2) 贵州清镇 4 个季节的蒸发量均呈减少趋势, 减少程度不一, 夏季减少趋势最为明显, 春季, 冬季、秋季依次减少, 减少趋势分别为 24.4mm/10a、16.04mm/10a、9.0mm/10a、7.5mm/10a。蒸发量的减少趋势春季、夏季表现得较显著, 春季和夏季蒸发量占全年蒸发量的 66.2%, 春、夏两季蒸发是全年蒸发的主要贡献因子, 两季的蒸发对水循环有重要的作用。四季 M-K 分析显示, 蒸发量均发生突变, 春、夏、秋季节出现 1 次突变, 冬季出现 5 次。小波分析显示, 四季均出现 4 类不同时间尺度的变化特征, 四季小波变化主周期分别为 30 年、29 年、31 年、31 年。

(3) 贵州清镇年蒸发量呈下降趋势, 偏多年和偏少年交替出现。1990 年前后了 1 次突变。蒸发量年变化存在 4 类时间尺度周期小波变化特征, 30 年是主周期。年代蒸发量呈下降趋势, 70 年代蒸发量为最大值。

(4) 对蒸发量影响因子进行分析表明, 贵州清镇能量供给因子中的气温日较差、日照百分率呈下降趋势, 平均温度、最高气温、最低温度、低云量呈上升趋势; 湿度因子中降水量、相对湿度呈下降趋势, 水汽压呈显著上升趋势, 空气动力因子风速呈显著下降趋势。蒸发量影响因素相关分析显示, 相关气象要素与蒸发量有着密切的相关性, 蒸发量变化受多种气象要素的综合影响。对年蒸发影响因素进行主成分分析, 存在 3 个成分特征值, 且累计贡献率=81.80%。分析因子载荷显示 3 个主成分, 平均气温、最高气温、最低气温在成分 1 上有较高载荷, 气温日较差、日照百分率、低云量在成分 2 上有较高载荷, 相对湿度、风速在成分 3 上有较高载荷。

参考文献:

[1] 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.

-
- [2]PETERSON T C, GOLUBEV V S, GROISMAN P Y. Evaporation losing its strength[J]. Nature, 1995, 377(6551):687-688.
- [3]RODERICK M L, FARQUHAR G D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002[J]. International journal of climatology, 2004, 24(9):1077-1090.
- [4]OHMURA A, WILD M. Is the hydrological cycle accelerating?[J]. Science, 2002, 298(5597):1345-1346.
- [5]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.
- [6]CHATTOPADHYAY N, HULME M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change[J]. Agricultural and forest meteorology, 1997, 87(1):55-73.
- [7]BRUTSAERT W, PARLANGE M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox[J]. Nature, 1998, 396(6706):30.
- [8]COHEN S, IANETZ A, STANHILL G. Evaporative climate changes at bet Dagan, Israel, 1964 - 1998[J]. Agricultural and forest meteorology, 2002, 111(2):83-91.
- [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]左洪超, 李栋梁, 胡隐樵. 近四十年中国气候变化趋势及其同蒸发皿观测的蒸发量变化的关系[J]. 科学通报, 2005, 50(11):1125-1130.
- [11]刘敏, 沈彦俊, 曾燕, 等. 近 50 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因[J]. 地理学报, 2009, 64(3):259-269.
- [12]秦年秀, 陈喜, 薛显武, 等. 贵州蒸发皿蒸发量变化趋势及影响因素分析[J]. 湖泊科学, 2009, 21(3):434-440.
- [13]邱新法, 刘昌明, 曾燕. 黄河流域近四十五年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4):437-442.
- [14]郭军, 任国玉. 黄淮海流域蒸发量的变化及其原因分析[J]. 水科学进展, 2005, 16(5):666-672.
- [15]曾燕, 邱新法, 刘昌明, 等. 1960-2000 年中国蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. 水科学进展, 2007, 18(3):311-318.
- [16]刘波, 马柱国, 丁裕国. 中国北方近 45 年蒸发变化的特征及与环境的关系[J]. 高原气象, 2006, 25(5):840-848.
- [17]申双和, 盛琼. 45 年来中国蒸发皿蒸发量的变化特征及其成因[J]. 气象学报, 2008, 66(3):452-460.
- [18]苏洪超, 魏文寿, 韩萍. 新疆近 50a 来的气温和蒸发变化[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2):174-178.
- [19]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.
- [20]吉文娟, 杨晓鹏, 张加云. 滇池流域蒸发量时空变化特征及趋势分析[J]. 气象科技, 2016, 44(4):631-639.

-
- [21]杨保华, 李靖卜, 樊毅, 等. 云南干热河谷蒸发量的小波多时间尺度分析[J]. 云南农业大学学报, 2008, 23(5):679-682.
- [22]朱华亮, 温华洋, 邱康俊. 基于两种方法的小型蒸发器与 E-601B 蒸发器蒸发量折算研究[J]. 气象水文海洋仪器, 2018(1):21-26.
- [23]魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [24]施能. 气象科研与预报中的多元分析方法[M]. 北京: 气象出版社, 2002:120-122, 143-146.