

李秀芬,姜丽霞,李险峰,等,2021.1961—2017年黑龙江省蒸发量演变特征及其与气候因子的关系[J].气象,47(6):755-766.
Li X F, Jiang L X, Li X F, et al, 2021. Evolution characteristics of evaporation and its relationship with climate factors in Heilongjiang Province from 1961 to 2017[J]. Meteor Mon, 47(6):755-766(in Chinese).

1961—2017 年黑龙江省蒸发量演变特征 及其与气候因子的关系*

李秀芬^{1,2} 姜丽霞^{1,2} 李险峰³ 赵放⁴ 朱海霞^{1,2}
王萍^{1,2} 宫丽娟^{1,2} 赵慧颖^{1,2}

1 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030

2 中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室, 哈尔滨 150030

3 黑龙江省水利科学研究院, 哈尔滨 150080

4 哈尔滨市气象局, 哈尔滨 150028

提 要: 利用黑龙江省 80 个站 1961—2017 年器测蒸发量观测资料及常规气象观测资料, 采用线性倾向估计、累积距平、Mann-Kendal 突变分析、数理统计和 Mexican hat 小波分析等方法, 分析了黑龙江省年和四季器测蒸发量的时空演变特征, 并探讨了其与气候因子的关系。结果表明: 黑龙江省年蒸发量的空间分布的地理特征明显, 其值随纬度、经度、海拔高度的增加而递减, 递减率分别为 $55.4 \text{ mm}/^\circ\text{N}$ 、 $45.2 \text{ mm}/^\circ\text{E}$ 、 $88.8 \text{ mm}/(100 \text{ m})$ 。1961—2017 年, 黑龙江省年蒸发量呈显著下降趋势, 降幅达 $13.7 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, 存在 8 a 和 24 a 周期, 全省下降趋势站点比例达 70.0%, 其中 62.5% 站点的下降趋势通过 0.05 的显著性水平检验, 远超上升站点比例, 总体存在“蒸发悖论”。季节间对照发现, 春季蒸发量降幅较大且趋势极显著, 存在 24 a、准 2 a 周期, 有 67 个站点表现为下降趋势, 其中 44 个站呈显著下降趋势 ($P < 0.05$); 夏季、秋季的降幅较小且变化不显著, 均存在 7 a 周期; 冬季则表现为小幅不显著的增加趋势, 存在 24、11、2 a 周期, 有 23 站冬季蒸发量呈显著上升趋势。突变检验发现, 年、春季、冬季蒸发量存在明显的突变时间, 夏季和冬季则无明显突变。年、季节蒸发量与平均温度、风速存在正相关关系, 与相对湿度存在负相关关系。风速显著下降是导致年蒸发量显著减少的主导因素, 风速显著下降及增湿明显的叠加作用, 致使春季蒸发量的下降趋势更显著, 而气候的暖干化使得冬季蒸发量呈较弱的上升趋势。

关键词: 黑龙江省, 器测蒸发量, 演变特征, 相关关系, 蒸发悖论

中图分类号: P426

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.06.011

Evolution Characteristics of Evaporation and Its Relationship with Climate Factors in Heilongjiang Province from 1961 to 2017

LI Xiufen^{1,2} JIANG Lixia^{1,2} LI Xianfeng³ ZHAO Fang⁴ ZHU Haixia^{1,2}
WANG Ping^{1,2} GONG Lijuan^{1,2} ZHAO Huiying^{1,2}

1 Heilongjiang Province Institute of Meteorological Sciences, Harbin 150030

2 Innovation and Opening Laboratory of Eco-Meteorology in Northeast China, CMA, Harbin 150030

3 Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute, Harbin 150080

4 Harbin Meteorological Bureau, Harbin 150028

Abstract: In this study, instrument-measured evaporation and conventional meteorological observations

* 国家自然科学基金面上项目(31671576、31671575)、国家青年科学基金项目(31801253)和中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室开放研究基金重点项目(stqx2019zd02)共同资助

2020 年 2 月 17 日收稿; 2020 年 7 月 16 日收修定稿

第一作者: 李秀芬, 主要从事生态与农业气象、气候资源及变化研究. E-mail: ge-2003@163.com

from 80 stations in Heilongjiang Province from 1961 to 2017 were collected. Using these data, methods such as linear trend estimation, cumulative anomaly, Mann-Kendal mutation analysis, mathematical statistics and Marr's wavelet analysis were employed to analyze the annual and seasonal characteristics of the spatio-temporal evolution of instrument-measured evaporation in Heilongjiang Province. Additionally, the relationships of the characteristics with climate factors were analyzed. The results show that the geographical correlation of annual evaporation is significant. Annual evaporation decreases as latitude, longitude and altitude increased. The decreasing rates are 55.4 mm/°N, 45.2 mm/°E and 88.8 mm/(100 m), respectively. From 1961 to 2017, annual evaporation in Heilongjiang Province showed a significant downward trend, decreasing at 13.7 mm/(10 a). Annual evaporation had 8 a and 24 a cycles. Statistics show that at up to 70.0% of the stations, the annual pan evaporation show a downward trend, of which 62.5% of the stations have passed the significance test at 0.05 level, which means there is "evaporation paradox" in Heilongjiang Province. Exploring seasonal pan evaporation trend shows that evaporation decreased significantly in spring, having 24 a and quasi-2 a cycles, and 67 stations show a downward trend, 44 of which show a significant downward trend ($P < 0.05$). However, the magnitude of this decrease in summer and fall is relatively small with non-significant changes, with 7 a cycles. In winter, evaporation increase slightly having 24 a, 11 a, and 2 a cycles and 23 stations show a significant rising trend. Mutation test shows that there is a significant mutation time of evaporation in year, spring and winter, but no significant mutation in summer and autumn. Additionally, it is found that changes in annual and seasonal pan evaporation are positively correlated with average temperature and wind speed, and negatively correlated with humidity. Our analysis indicates that a significant decrease in wind speed is the dominant factor leading to the decrease in evaporation throughout the year, and the superposition effect of a significant decrease in wind speed and obvious humidification makes the decrease trend of spring evaporation more significant. The higher temperature and lower relative humidity climate may be the cause of the slight increase in evaporation in winter.

Key words: Heilongjiang Province, instrument-measured evaporation, evolution characteristic, correlation, evaporation paradox

引 言

蒸发作为陆-气水循环系统的纽带,在地表水资源重新分配中扮演着重要的角色,平均而言,陆地蒸发产生的降水占全球陆地总降水量的 65% (Chahine, 1992)。21 世纪以来,由蒸散发再凝结形成的降水量增加,大气内循环活跃程度加大(姜彤等, 2020)。蒸发量的变化影响着全球水分循环和能量平衡,作为重要的指标,在水文监测预测、水利工程设计、水资源评价及气候区划等领域应用广泛(庄晓翠等, 2010; 荣艳淑等, 2012; 程海涛和慕彩芸, 2009)。蒸发皿蒸发量(即器测蒸发量)虽然不能代表实际蒸发量,但是作为区域蒸发能力的一种体现,其值的大小及变化趋势可以代表某地区大气蒸发能力,同时也能反映该区域干湿状况的变化以及对区

域气候变化的影响。因此,研究器测蒸发量的变化对深入了解气候变化规律、探讨气候变化成因具有十分重要的意义。器测蒸发量资料具有覆盖范围广、累积序列长、可比性好等优势,为此,许多学者侧重于器测蒸发量开展研究(Peterson et al, 1995; 邱新法等, 2003; Liu et al, 2009; 2011; 石明星等, 2018),获得了大量的成果。众多研究发现,气候变暖背景下的全球大部分地区的器测蒸发量随温度升高不升反降趋势明显(Peterson et al, 1995; Chattopadhyay and Hulme, 1997; Cohen et al, 2002; Burn and Hesch, 2007; Liu et al, 2009),即存在“蒸发悖论”(Roderick and Farquhar, 2002)。导致“蒸发悖论”现象产生的气候机制因地域不同而有所差异。在中国,器测蒸发量表现为显著下降趋势,但其主要影响因子略有差异,曾燕等(2007)认为主要影响因子为辐射和气温日较差;申双和和盛琼(2008)将其

归因于日照时数和风速的变化;祁添垚等(2015)的研究发现,相对湿度是器测蒸发量变化的关键影响因素。在黄河流域,“蒸发悖论”具有空间上和时间上的不一致性,其主导因素是风速的明显减小(马雪宁等,2012)。在中国北方地区,则多将蒸发量的减小归因于气温日较差的减小、风速的下降、太阳总辐射的减少及水汽压的降低(Liu et al, 2011;朱红蕊等,2013;岳元等,2017;杨璐等,2019)。京津冀地区,平均风速是其平原区蒸发量变化的主导因子,而在山区和高原地区,日照时数则是主导因子(于占江和杨鹏,2018)。在同样的气候背景下,部分地区的蒸发皿蒸发量也有增多现象(石明星等,2018)。大量的研究成果表明,无论蒸发量的增多还是减少,重要的是在气候变暖的背景下存在蒸发量发生了明显变化这一事实,但由于研究区域、研究时段、站点数等诸多因素的不同,导致结论存在一定的偏差,从而凸显了开展长时间序列、精细化的小区域的动态研究的重要性。

黑龙江省作为中国粮仓和东北亚生态屏障,担负着保障国家粮食安全和生态安全的双重重任。在气候变化背景下,黑龙江省气候变暖显著(于梅等,2009;陈晶,2013;肖冰霜等,2016)的同时,水资源供给条件、分配方式也发生了相应的变化,特别是 20 世纪 90 年代以来,全省旱情自南向北逐渐加强(Zhao et al, 2019),同时极端降水事件频繁发生(朱海霞等,2019)。气候干湿的剧烈交替,较大地影响着该地区生态环境和社会经济的发展。为加深对黑龙江省蒸发能力随气候变化演变特征的理解,验证黑龙江省是否存在“蒸发悖论”,本文综合考虑热力、动力、湿度等 3 类因子,建立蒸发量的多元线性回归模型,以探讨其与气候因子的关系。研究结果有助于揭示区域水旱灾害成因,为准确判识、预估旱涝趋势,合理制定水资源高效利用途径提供科学参考依据。

1 资料与方法

1.1 资料

本文所用资料来自黑龙江省 80 个常规气象站(图 1)1961—2017 年的逐日观测资料,包括器测蒸发量(小型、E-601 型)、平均气温、最高气温、最低气温、平均风速、日照时数、降水量、平均相对湿度和平

均水汽压等。针对 2002—2017 年 5—9 月 E-601B 型蒸发皿蒸发量资料,按照换算系数(任芝花等,2002)统一折算成小型蒸发皿蒸发量后使用;对于缺测漏测值则通过建立其与本站气温、降水、日照、相对湿度及风速等多元线性回归模型进行插补(祁添垚等,2015)。季节划分采用气象季节,即:春季为 3—5 月、夏季为 6—8 月、秋季为 9—11 月、冬季为 12 月—次年 2 月。各站年、季节蒸发量通过相应时段的逐日蒸发量观测值累加获得;黑龙江省年、季节蒸发量为 80 个站年、季节蒸发量的算术平均。

1.2 研究方法

1.2.1 线性倾向分析法

本文采用线性倾向估计法(魏凤英,2007;赵慧颖等,2017),通过建立蒸发量(EP_i)与对应年(t_i)建立的一元线性回归方程,分析年、季节蒸发量的变化趋势,公式如下:

$$EP_i = a + bt_i \quad (1)$$

式中: a 为回归常数, b 为回归系数,通过最小二乘法确定。当 $b > 0$ ($b < 0$) 时,说明蒸发量随时间呈上升(下降)趋势,以 $10b$ 值的大小表示蒸发量上升(下降)的倾向程度。其年、季节变化的显著性水平通过 t 检验进行判断: $\alpha = 0.1$,变化趋势较显著; $\alpha = 0.05$,变化趋势显著; $\alpha = 0.01$,变化趋势极显著。

1.2.2 累积距平分析法

本文通过累积距平(魏凤英,2007)曲线的起伏,

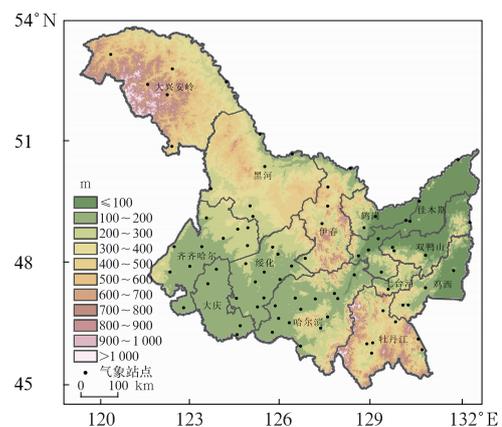


图 1 黑龙江省 80 个气象观测站分布
(填色为海拔高度)

Fig. 1 Locations of 80 meteorological stations in Heilongjiang Province
(colored; altitude)

直观判断年、季节蒸发量的变化趋势及持续性变化,对于气候要素(x_i)序列,其某一时刻 t 的累积距平(X_t)表示为:

$$X_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

1.2.3 Mann-Kendall 突变检验法

采用非参数 Mann-Kendall 法(魏凤英, 2007)对黑龙江省年、季节器测蒸发量进行突变检验。对具有 n 个样本的时间序列 x 的顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 构建秩序列 S_k , 即

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

$$r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i$$

式中: x_i 和 x_j 分别为第 i 年和第 j 年年、季节蒸发量。

在时间序列随机独立的假定下,定义统计量

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中: $UF_1 = 0$; $E(S_k)$ 、 $\text{var}(S_k)$ 分别为 S_k 的均值和方差,计算公式如下:

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4}$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (6)$$

$$k = 2, 3, \dots, n$$

重复上述计算过程,按时间序列 x 的逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 计算统计量 $UB_k, UB_1 = 0$ 。绘制 UF_k 和 UB_k 曲线,若 $UF_k > 0$ 或 $UF_k < 0$, 则表明序列呈上升或下降趋势;若 UF_k 超过临界值时,则表明上升或下降趋势显著;若 UF_k 和 UB_k 两条曲线在临界线之间有交点,一般来说交点对应的时刻即突变开始的时间。对于存在的虚假突变点,结合累积距平曲线剔除。本研究采用 $\alpha = 0.05$ 显著性水平,其临界值为 ± 1.96 。

1.2.4 Mexican hat 小波分析方法

本文采用小波分析法来识别年、季节蒸发量序列在一定时间尺度下的周期变化特征、小波方差分析该序列的周期尺度。连续小波变换可以定义为(Zhao et al, 2016; 冯禹昊和朱江玲, 2019):

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (7)$$

式中: $f(t)$ 为原始信号, t 为时间参数, a 为尺度因子, b 为位移因子, $\overline{\Psi(t)}$ 为小波母函数 $\Psi(t)$ 的复共轭函数, $W_f(a, b)$ 为小波系数。取 Mexican hat 小波函数作为小波母函数,形式如下(魏凤英, 2007; 赵景波等, 2012):

$$\Psi(t) = (1-t^2) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2}$$

$$-\infty < t < \infty \quad (8)$$

2 结果与分析

2.1 蒸发量的地理分布特征

利用黑龙江省 80 个站多年平均年蒸发量(PE)与地理因子——纬度(N)、经度(E)、海拔高度(H)建立多元回归方程,以描述年蒸发量的地理分布特征。建立的回归方程如下:

$$PE = 9859.670 - 55.360N - 45.182E - 0.888H \quad (9)$$

式中:复相关系数 $R = 0.801$, 通过了 0.001 的显著性水平检验。分析图 2 可知,年蒸发量总体表现为松嫩、三江两大平原区高,大、小兴安岭山地及牡丹江半山区低。其大值区位于松嫩平原,绝大部分地区的年蒸发量大于 1200 mm, 最大值出现在其南部地区(大于 1600 mm);三江平原次之,大部分地区年蒸发量为 1200~1600 mm;大、小兴安岭山地及牡丹江半山区大部最少(小于 1000 mm)。分析式(9)可知,年蒸发量随地理因子的变化增减明显,在

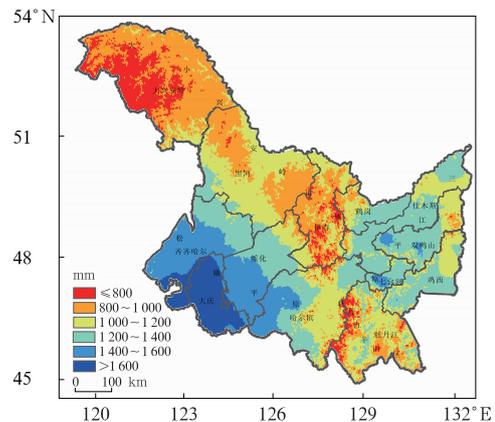


图 2 1961—2017 年黑龙江省多年平均年蒸发量的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of annual average pan evaporation in Heilongjiang from 1961 to 2017

同经度、同高度下,纬度每增加 1°,年蒸发量减少 55.4 mm;在同纬度、同高度下,经度每增加 1°,年蒸发量减少 45.2 mm;在同经度、同纬度下,海拔高度每增高 100 m,年蒸发量减少 88.8 mm。

2.2 蒸发量时间变化

1961—2017 年,黑龙江省年蒸发量变化总体呈波动下降的趋势(图 3a),降幅为 13.7 mm/(10 a),通过了 0.05 显著性水平检验;年蒸发量的多年均值为 1296.0 mm,最大值为 1507.8 mm,出现在 1982 年,最小值仅为 1147.3 mm,出现在 2013 年,差值达 360.5 mm。突变检验结果显示(图 4a),年蒸发量和曲线在 0.05 显著性水平下存在多个交点,其中,1977—1978 年的曲线超出了 0.05 显著性水平上限,1993—1997 年超出了 0.05 显著性水平下限,表明年蒸发量存在明显的时间突变,结合累积距平曲线(图 4b),确定 1983 年、2001 年为突变年。综合分析图 3 和图 4,近 57 年,年蒸发量经历了 3 个阶

段变化:1961—1982 年为偏多期,68.2%的年份为正距平年;1983—2000 年为持续偏少期,94.4%的年份为负距平年;2001—2017 年为先增后减期,58.8%的年份为负距平年。

春季蒸发量以 13.1 mm/(10 a)的幅度呈显著下降趋势(图 5a),通过 0.01 的显著性水平检验。突变检验发现(图 6a),*UF* 和 *UB* 曲线在 0.05 显著性水平下有 1 个交点,且 20 世纪 90 年代以来,*UF* 值超过显著性水平 0.05 显著性水平下限,甚至超过 0.001 显著性水平下限(临界值为 ±2.56),表明春季蒸发量存在明显的时间突变,突变开始时间为 1986 年,突变前后其均值分别为 477.1、430.0 mm,相差 47.1 mm。综合分析图 5a 和图 6a,1961—1985 年为春季蒸发量偏多阶段,80.0%的年份为正距平年,1986—2017 年为偏少期,71.9%的年份为负距平年。

夏季、秋季蒸发量均呈小幅度不显著的减少趋势(图 5b、5c),累积距平曲线特征与年蒸发量累积

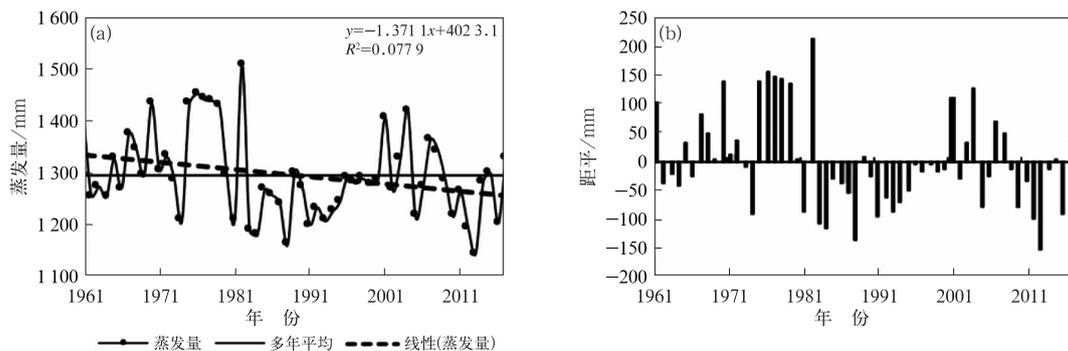


图 3 1961—2017 年黑龙江省年蒸发量时间变化曲线(a)和距平直方图(b)
Fig. 3 Time variation curve (a) and anomaly histogram (b) of annual evaporation in Heilongjiang from 1961 to 2017

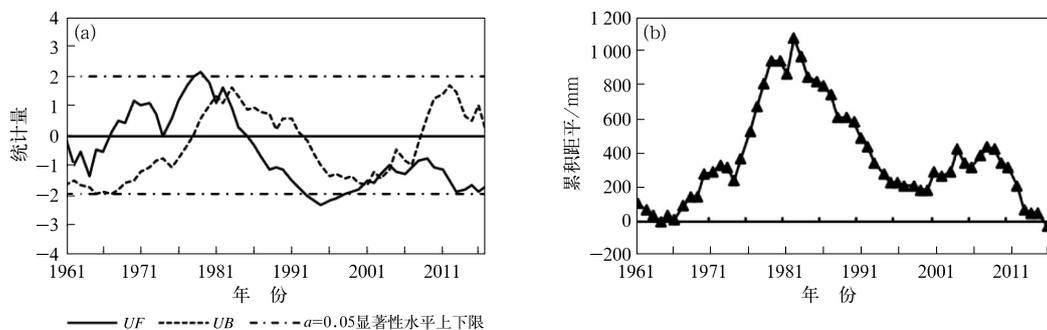


图 4 1961—2017 年黑龙江省年蒸发量 Mann-Kendall 突变检验(a)和累积距平曲线(b)
Fig. 4 Mann-Kendall test (a) and accumulated anomaly curve (b) of annual pan evaporation in Heilongjiang from 1961 to 2017

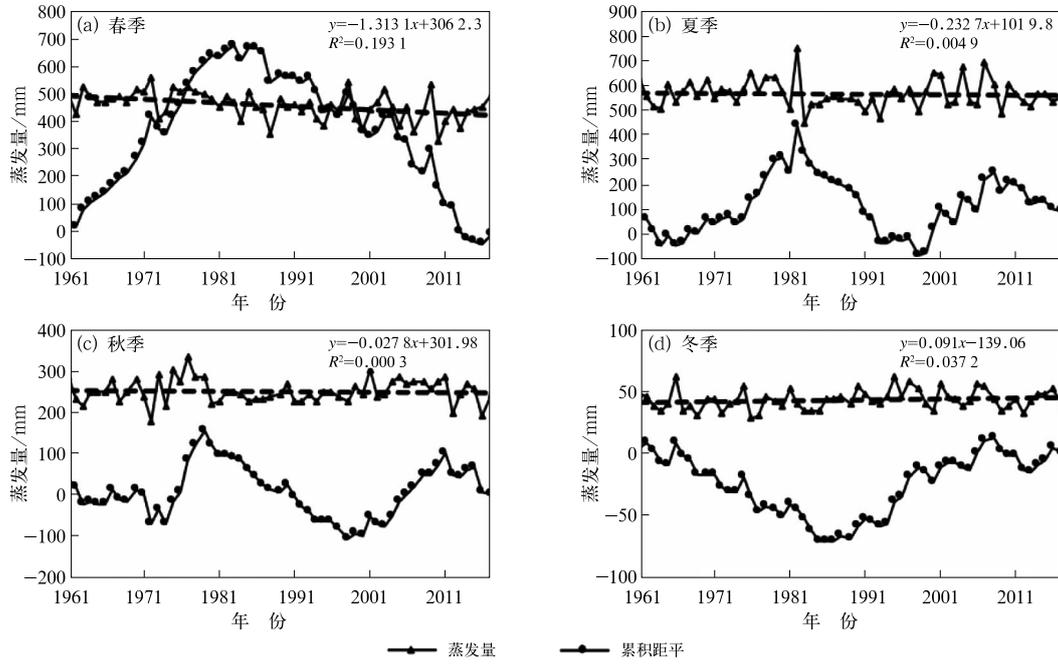


图 5 1961—2017 年黑龙江省春(a),夏(b),秋(c)和冬(d)季蒸发皿蒸发量特征曲线
 Fig. 5 Characteristic curves of seasonal pan evaporation in Heilongjiang from 1961 to 2017
 (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

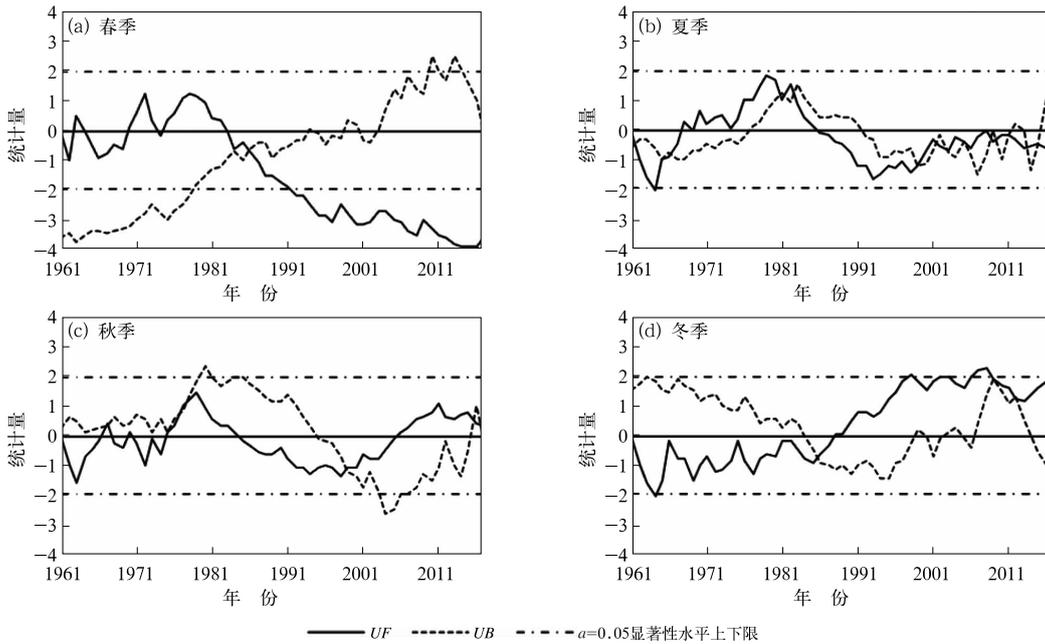


图 6 1961—2017 年黑龙江省春(a),夏(b),秋(c)和冬(d)季蒸发量突变检验
 Fig. 6 Mann-Kendall test curves of spring (a), summer (b), autumn (c) and winter (d) pan evaporation in Heilongjiang 1961—2017 年

距平曲线相似。突变检验发现(图 6b、6c),UF 和 UB 线在 0.05 显著性水平下均存在多个交点,但 UF 值均未超过 0.05 显著性水平,表明夏季、秋季蒸发量不存在明显的时间突变。

冬季蒸发量呈小幅度不显著上升趋势(图 5d),UF 和 UB 线在 0.05 显著性水平下有 1 个交点(图 6d),其中,1964 年达显著性水平下限,1997—2009 年,UF 值在显著性水平线上波动,且多次超过

其上限值,表明冬季蒸发量存在明显的时间突变,突变开始时间为 1986 年,突变前后其均值分别为 39.2、44.2 mm,相差 6.0 mm。其累积距平曲线表现为以 1986 年为转折,呈现先降后升特征。

2.3 蒸发量变化趋势的空间分布

从图 7 可以看出,1961—2017 年,黑龙江省 80 个站年蒸发量下降趋势的范围较大,其中 35 个站的年总蒸发量显著下降趋势,站点主要分布在松嫩平原、三江平原和牡丹江山区;9 个站呈显著上升趋势,有 4 个站分布在黑河市,其他 5 个站分别分布在大兴安岭、哈尔滨、佳木斯、鸡西和牡丹江等地。计算年蒸发量的倾向率发现,逊克站增幅最大,倾向率达 55.2 mm/(10 a),乌伊岭站增幅最小,仅为 0.3 mm/(10 a);降幅最大和最小站均出现在绥化市,其中,兰西站降幅达 90.6 mm/(10 a),望奎站仅为 0.3 mm/(10 a)。

器测蒸发量的变化趋势在不同季节表现为不同的空间分布特征(图 8)。从图 8a 可知,春季蒸发量下降趋势的空间分布特征与图 7 基本相似,但范围略大,44 个站春季蒸发量呈显著下降趋势,集中在松嫩平原、三江平原及牡丹江半山区;仅 4 个站蒸发量呈显著上升趋势,分布在大兴安岭北部及黑河中部地区。夏季蒸发量下降的区域明显缩小(图 8b),仅 14 个站蒸发量呈显著下降趋势,集中分布在哈尔滨西部、伊春南部、绥化南部;显著增加站点有所增加,达 9 个站,分布在黑南部(4 站)及呼玛、克山、富

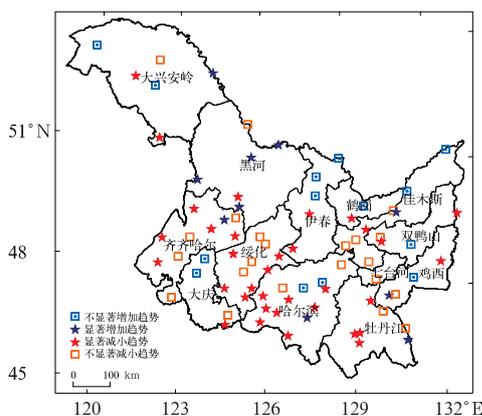


图 7 1961—2017 年黑龙江省年总蒸发量变化趋势的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of the trends of annual evaporation in Heilongjiang from 1961 to 2017

锦、尚志、穆棱等地。秋季蒸发量下降区域进一步缩小(图 8c),仅 9 个站蒸发量呈显著下降趋势,零星分布在中、东部地区;显著增加站点增加至 17 个站,除伊春外各地市均有分布。冬季蒸发量上升、下降趋势站点相当(图 8d),上升趋势趋强,有 23 个站蒸发量呈显著增加趋势,主要分布在大、小兴安岭地区及三江平原北部,仅龙江、明水、铁力、虎林等 4 个站蒸发量呈明显下降趋势。

2.4 蒸发量周期特征

1961—2017 年 Mexican hat 小波分析发现,年蒸发量在 5~10 a 尺度上周期规律明显(图 9a),期间经历了“偏少—偏多—偏少—偏多—偏少”5 个循环交替,到 2017 年等值线也没有闭合,说明在未来一段时间内年蒸发量仍将处于偏少期;且随着时间尺度的增加,在 21~26 a 尺度上,在 20 世纪 80 年代中期存在较明显的由偏多向偏少的转折。

分析各季节蒸发量的周期特征表现。春季蒸发量在 5 a 以下尺度上虽波动剧烈,但周期规律不明显;在 21~27 a 尺度上,在 20 世纪 80 年代中期存在明显的由偏多向偏少转折(图 9b)。从图 9c、9d 可以看出,夏季、秋季蒸发量具有相似的周期规律,均在 6~9 a 尺度上经历了“偏少—偏多—偏少—偏多—偏少”5 个循环交替,且到 2017 年等值线均未闭合,说明在未来一段时间内夏季、秋季蒸发量仍将处于偏少期。冬季蒸发量的周期变化规律不同于其他三个季节(图 9e),在 2 a 尺度上存在多个短期周期振荡;在 11 a 左右尺度上则经历了“偏少—偏多—偏少”3 个循环交替;在 20~27 a 尺度上存在与春季相反的振荡趋势,在 20 世纪 80 年代中后期存在较明显由偏少向偏多的转折。

利用小波系数方差对黑龙江省蒸发量的周期进行分析发现(图 10),1961—2017 年黑龙江省年蒸发量存在 8 a、24 a 周期;春季存在 24 a、准 2 a 周期;夏季、秋季均存在 7 a 周期;冬季存在 24 a、11 a、2 a 周期。

2.5 蒸发量与气候因子的关系

综合分析年、季节蒸发量与相应时段各气候因子的相关关系及各气候因子的时间变化趋势(表 1),结合各气候因子间的相关关系(表略),筛选了与蒸发量密切相关且独立性较好的平均温度(T)、相对湿度(RH)、风速(W)等 3 个因子,构建黑龙江省年、季节

蒸发量的气候影响多元线性回归方程。

由于各气候因子与蒸发量的单位、量纲不尽相

同,为准确描述气候因子对蒸发量的影响程度,先对其进行标准化处理,然后建立多元回归方程,并计算

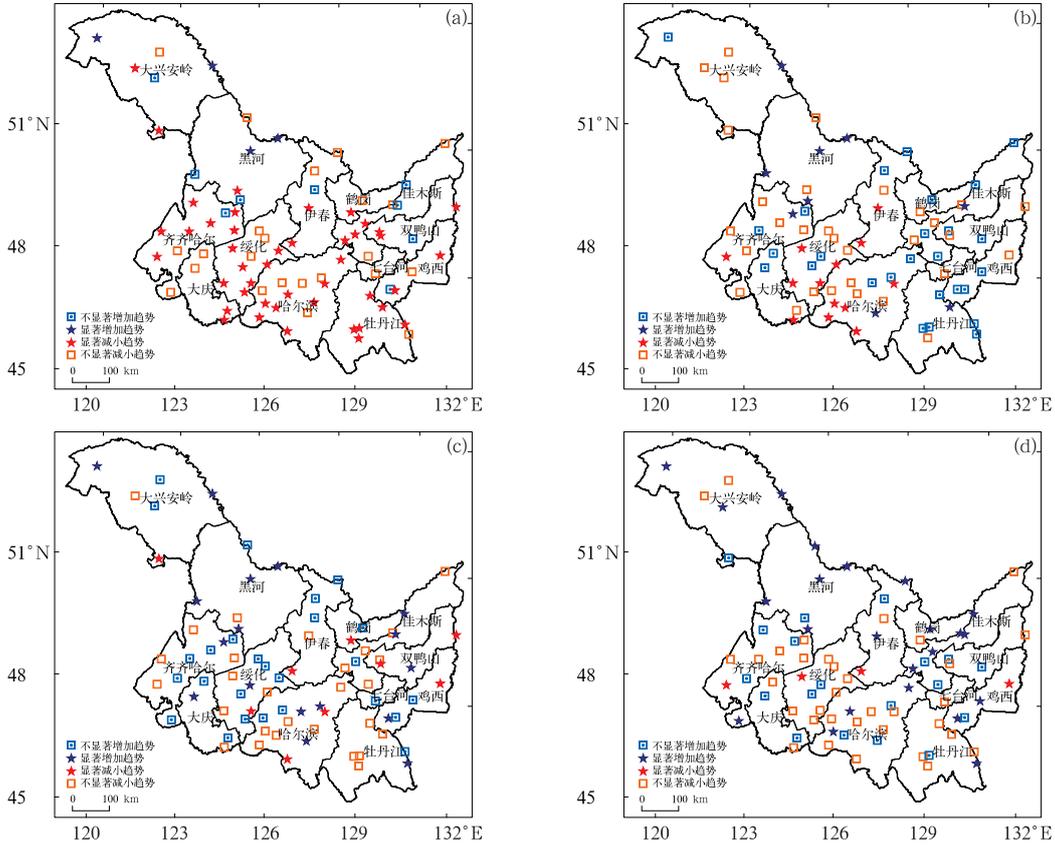


图 8 1961—2017 年黑龙江省春(a)、夏(b)、秋(c)、冬(d)季器测蒸发量变化趋势的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the trends of spring (a), summer (b), autumn (c) and winter (d) evaporation in Heilongjiang from 1961 to 2017

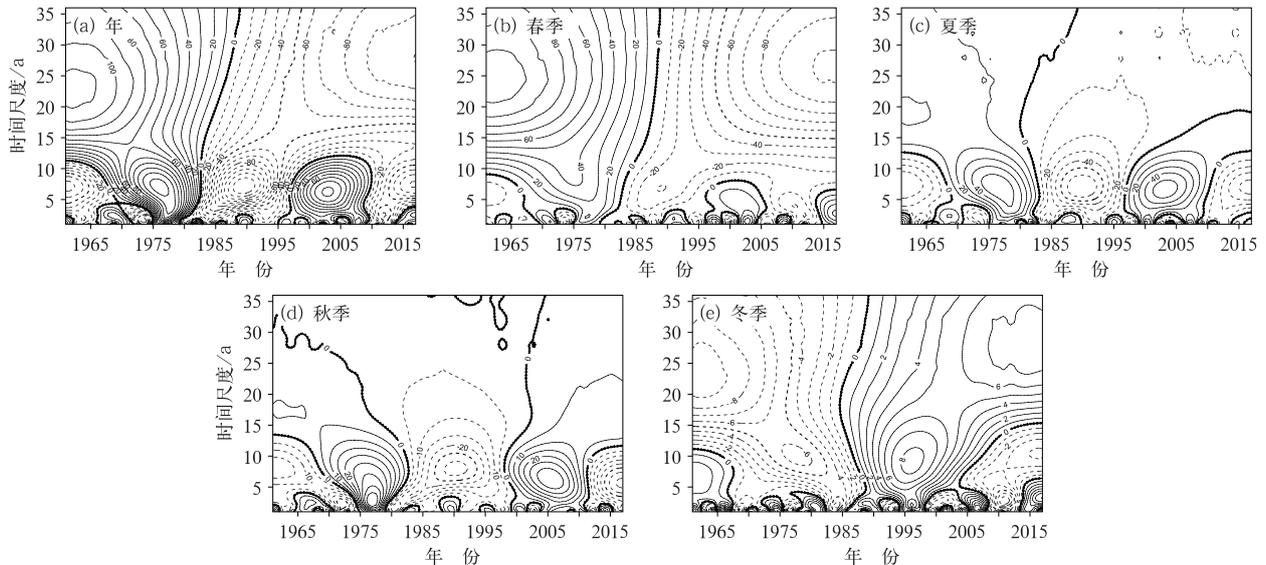


图 9 1961—2017 年黑龙江省年(a)、春(b)、夏(c)、秋(d)、冬(e)季蒸发量小波分析

Fig. 9 Wavelet analysis of pan evaporation annual (a) and spring (b), summer (c), autumn (d), winter (e) in Heilongjiang from 1961 to 2017

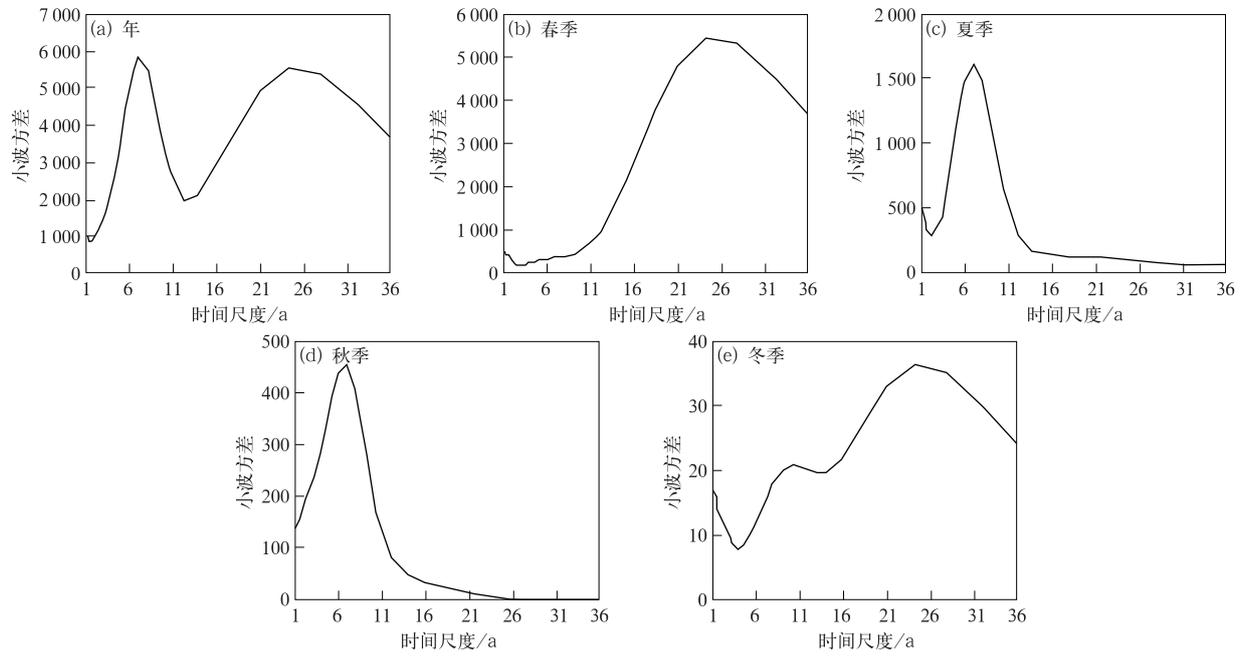


图 10 同图 9, 但为小波方差
Fig. 10 Same as Fig. 9, but for wavelet variance

表 1 黑龙江省平均各气候因子的气候变化趋势及与相应时段蒸发量相关系数

Table 1 Climate change trend of the average climate factors in Heilongjiang and the correlation coefficient with the evaporation in the corresponding period

时段	项目	平均温度 /°C	最低温度 /°C	最高温度 /°C	温差 /°C	降水量 /mm	相对湿度 /%	日照时数 /h	风速 /m·s ⁻¹	水汽压 /hPa
年	与蒸发量相关	0.0778	-0.1954	0.3664**	0.7493**	-0.6797**	-0.6213**	0.6485**	0.3513**	-0.2050
	气候趋势系数	0.5865**	0.7498**	0.3340*	-0.7196**	0.1530	-0.0564	-0.5356**	-0.9507**	0.0899
	气候倾向率/10 a	0.28	0.42	0.15	-0.27	6.57	-0.07	-36.28	-0.26	-0.04
春季	与蒸发量相关	0.3192*	0.0027	0.5377**	0.8318**	-0.4929**	-0.7834**	0.5807**	0.5610**	-0.4083**
	气候趋势系数	0.3955**	0.6232**	0.1666	-0.7080**	0.4288**	0.2150	-0.4588**	-0.9063**	0.4269**
	气候倾向率/10 a	0.30	0.51	0.14	-0.37	6.08	0.49	-10.58	-0.33	0.13
夏季	与蒸发量相关	0.5203**	0.0153	0.7696**	0.8491**	-0.6887**	-0.9154**	0.8334**	0.1857	-0.1164
	气候趋势系数	0.4956**	0.7388**	0.2854*	-0.4335**	-0.0730	0.0311	-0.2716*	-0.8723**	-0.0383
	气候倾向率/10 a	0.22	0.36	0.15	-0.20	-2.58	0.06	-10.24	-0.20	-0.05
秋季	与蒸发量相关	0.4262**	0.0918	0.6740**	0.7797**	-0.7292**	-0.7591**	0.7627**	0.0798	-0.4127**
	气候趋势系数	0.3539**	0.5085**	0.1751	-0.4254**	0.0268	-0.1571	-0.3521**	-0.9242**	0.1872
	气候倾向率/10 a	0.22	0.34	0.12	-0.23	0.50	-0.36	-9.44	-0.27	0.06
冬季	与蒸发量相关	0.8244**	0.7860**	0.8492**	0.1548	-0.0404	-0.6521**	0.2445*	0.0830	0.6100**
	气候趋势系数	0.3116*	0.4060**	0.1748	-0.6350**	0.6552**	-0.2513*	-0.3611**	-0.8443**	0.2992*
	气候倾向率/10 a	0.33	0.44	0.19	-0.25	2.51	-0.48	-6.2	-0.22	0.03

注: **、* 和 · 分别表示通过 0.01、0.05 和 0.10 显著性水平检验。
Note: **, *, · show passing the significance test at 0.01, 0.05, 0.10 levels, respectively.

各气候因子对蒸发量变化的相对贡献率(张嘉琪和任志远, 2014)。结果见表 2。式(10)~(14)中, EP_y 、 EP_{Sp} 、 EP_{Su} 、 EP_A 、 EP_W 分别为年和春、夏、秋、冬季全省平均蒸发量; T_y 、 T_{Sp} 、 T_{Su} 、 T_A 、 T_W 为相应时段的全省平均温度; RH_y 、 RH_{Sp} 、 RH_{Su} 、 RH_A 、 RH_W 为平均相对湿度; W_y 、 W_{Sp} 、 W_{Su} 、 W_A 、 W_W 为平

均风速。

由式(10)~式(14)可知,年、季节蒸发量对平均温度、风速存在正相关关系,对相对湿度存在负相关关系,且各气候因子与蒸发量的偏相关关系均通过了 0.05 及以上显著性水平检验。以相对贡献率来判断各气候因子对蒸发量的影响程度(表 2)。年尺

度上,平均温度、相对湿度、风速对蒸发量的影响程度大小排序为相对湿度>风速>平均温度,春季为风速>相对湿度>平均温度,夏季和秋季为相对湿度>平均温度>风速,冬季为平均温度>相对湿度>风速。结合表 1 分析可得,风速显著下降对年蒸发量的负效应远大于显著增温和不显著干化产生的正效应,导致年蒸发量呈显著下降趋势;春季风速显著下降、增湿明显对其蒸发量产生的叠加负效应远大于显著增温产生的正效应,致使春季蒸发量较年

蒸发量的下降趋势更明显;夏季显著增温对其蒸发量的正效应较大程度削弱了风速显著降低产生的负效应,一定程度减缓了夏季蒸发量的减少趋势;秋季增温显著、干旱化明显对其蒸发量产生的正效应较大程度削弱了风速显著下降产生的负效应,因此秋季蒸发量的下降趋势更不明显;而冬季则因气候暖干对其蒸发量的正效应略大于风速显著下降产生的负效应,使得冬季蒸发量呈较弱的上升趋势。

表 2 蒸发量气候影响多元回归方程及各气候因子的相对贡献率

Table 2 Climate response equation of evaporation and relative contribution rates of climate factors

时段	回归方程	复相关系数	偏相关系数			相对贡献率 %		
			T	RH	W	T	RH	W
年	$EP_y = 0.42 + 0.267T_y - 0.638RH_y + 0.385W_y$ (10)	0.746**	0.275*	-0.643**	0.523**	20.7	49.5	29.9
春季	$EP_{Sp} = 0.398 + 0.349T_{Sp} - 0.466RH_{Sp} + 0.517W_{Sp}$ (11)	0.912**	0.626**	-0.704**	0.743**	26.2	35.0	38.8
夏季	$EP_{Su} = 0.551 + 0.306T_{Su} - 0.627RH_{Su} + 0.208W_{Su}$ (12)	0.954**	0.660**	-0.898**	0.572**	26.8	55.0	18.2
秋季	$EP_A = 0.660 + 0.279T_A - 0.736TH_A + 0.205W_A$ (13)	0.846**	0.533**	-0.790**	0.454**	22.4	61.2	16.5
冬季	$EP_W = 0.186 + 0.855T_A - 0.439TH_W + 0.199W_W$ (14)	0.950**	0.910**	-0.802**	0.508**	57.3	29.4	13.4

注: **、* 分别表示通过 0.01、0.05 显著性水平检验。

Note: **, * show passing the significance test at 0.01, 0.05 levels, respectively.

3 结论与讨论

利用黑龙江省 80 个站 1961—2017 年器测蒸发量观测资料,运用线性倾向估计、累积距平、Mann-Kendall 突变检验、数理统计及 Mexican hat 小波分析等方法,对黑龙江省年、季节器测蒸发量的空间分布特征、趋势变化、周期规律进行了分析,并探讨了其与气候因子的关系,结果表明:

(1)1961—2017 年,黑龙江省年、春季蒸发皿蒸发量分别以 13.7、13.1 mm/(10 a) 幅度呈显著下降趋势。夏季和秋季蒸发量的降幅分别为 2.3 mm/(10 a) 和 0.3 mm/(10 a),冬季蒸发量的增幅为 0.9 mm/(10 a),此三个季节的增减趋势均不明显。年蒸发量下降趋势站点比例达 70.0%,其中,62.5% 站点的下降趋势通过 0.05 的显著性水平检验,远超过上升站点比例,验证了增暖显著的气候背景下黑龙江省总体存在“蒸发悖论”现象。季节蒸发量的增减

趋势具有不同的空间分布特征。春季蒸发量显著下降趋势区域最大,冬季显著增加趋势区域最大。

(2)突变检验发现,黑龙江省年、春季、冬季蒸发量存在明显的突变时间,夏季和秋季蒸发量不存在明显的时间突变。年蒸发量存在两个突变点,分别为 1983 年和 2001 年。春季和冬季蒸发量均存在一个突变点,且突变开始时间相同,为 1986 年,但变化趋势相反,春季自突变年起蒸发量呈显著减少趋势,冬季则呈显著增加趋势。

(3)黑龙江省年、季节蒸发量的周期规律明显。年蒸发量存在 8 a 和 24 a 周期;春季存在 24 a、准 2 a 周期;夏季、秋季均存在 7 a 周期;冬季存在 24、11、2 a 周期。在未来一段时间内,黑龙江省年和春、夏、秋三季的蒸发量将继续处于偏少阶段,而冬季蒸发量则仍将保持稍多态势。

(4)年蒸发量的地理特征明显,其值随纬度、经度、海拔高度的增减(增高)而递减。年蒸发量的最大值出现在松嫩平原南部(大于 1600 mm)。

(5)年、季节蒸发量对平均温度、风速等的变化存在正相关关系,对相对湿度的存在负相关关系。年、夏季、秋季相对湿度对其蒸发量变化的贡献最大,相对贡献率分别为49.5%、55.0%、61.2%;风速对春季蒸发量变化的贡献最大,相对贡献率为38.8%,相对湿度次之,为35.0%;平均温度对冬季蒸发量变化贡献最大,相对贡献率为57.3%。

研究表明,蒸发量的变化是多环境因子共同作用的结果(左洪超等,2006;杨司琪等,2019),其相关关系存在一定的地区差异(邱新法等,2003;曾燕等,2007;马雪宁等,2012;岳元等,2017;于占江和杨鹏,2018)。本研究表明,年、四季蒸发量的变化趋势与风速的变化趋势一致,这与已有的研究结论基本吻合(申双和和盛琼,2008;马雪宁等,2012)。年、季节蒸发量变化趋势的空间分布特征与朱红蕊等(2013)的研究结论大体一致;但与曾燕等(2007)、申双和和盛琼(2008)、祁添垚等(2015)的研究结论存在较大的差异,差异产生的可能原因是研究资料的时间序列不同,上述文献所用资料的时段分别为1960—2000年、1957—2001年、1960—2005年,本研究的资料时段为1961—2017年,因此,导致上述文献与本研究结论在要素变化趋势、周期特征上不一致。本研究系统分析了器测蒸发量的周期规律,并定量评价了其于气候因子的关系,这有别于已有的研究成果,对已有成果是有益的补充。

参考文献

- 陈晶,2013.黑龙江省气温时空变化特征分析[D].哈尔滨:东北农业大学. Chen J, 2013. Analysis on temporal and spatial variations of air temperature during 1961—2012 in Heilongjiang Province [D]. Harbin: Northeast Agricultural University (in Chinese).
- 程海涛,慕彩芸,2009. 东疆地区蒸发量变化趋势及气象影响因子研究[J]. 气象, 35(7): 68-72. Cheng H T, Mu C Y, 2009. Study on variety trend and meteorological influence factors of evaporation in eastern Xinjiang[J]. Meteor Mon, 35(7): 68-72 (in Chinese).
- 冯禹昊,朱江玲,2019. 基于Morlet小波的辽河径流量变化及其成因分析[J]. 水土保持研究, 26(2): 208-215. Feng Y H, Zhu J L, 2019. Analysis on runoff change and the driving force of the Liaohe River Basin based on Morlet wavelet[J]. Res Soil Water Conserv, 26(2): 208-215 (in Chinese).
- 姜彤,孙赫敏,李修仓,等,2020. 气候变化对水文循环的影响[J]. 气象, 46(3): 289-300. Jiang T, Sun H M, Li X C, et al, 2020. Impact of climate change on water cycle[J]. Meteor Mon, 46(3): 289-300 (in Chinese).
- 马雪宁,张明军,王圣杰,等,2012. “蒸发悖论”在黄河流域的探讨[J]. 地理学报, 67(5): 645-656. Ma X N, Zhang M J, Wang S J, et al, 2012. Evaporation paradox in the Yellow River Basin[J]. Acta Geogr Sin, 67(5): 645-656 (in Chinese).
- 祁添垚,张强,王月,等,2015. 1960~2005年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及其影响因素分析[J]. 地理科学, 35(12): 1599-1606. Qi T Y, Zhang Q, Wang Y, et al, 2015. Spatiotemporal patterns of pan evaporation in 1960—2005 in China: changing properties and possible causes[J]. Sci Geogr Sin, 35(12): 1599-1606 (in Chinese).
- 邱新法,刘昌明,曾燕,2003. 黄河流域近40年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. 自然资源学报, 18(4): 437-442. Qiu X F, Liu C M, Zeng Y, 2003. Changes of pan evaporation in the recent 40 years over the Yellow River Basin[J]. J Nat Res, 18(4): 437-442 (in Chinese).
- 任芝花,黎明琴,张纬敏,2002. 小型蒸发器对E-601B蒸发器的折算系数[J]. 应用气象学报, 13(4): 508-512. Ren Z H, Li M Q, Zhang W M, 2002. Conversion coefficient of small evaporation pan into E-601B pan in China[J]. J Appl Meteor Sci, 13(4): 508-512 (in Chinese).
- 荣艳淑,张行南,姜海燕,等,2012. 长江上游区域蒸发皿蒸发量变化及其对水分循环的影响[J]. 地球物理学报, 55(9): 2889-2897. Rong Y S, Zhang X N, Jiang H Y, et al, 2012. Pan evaporation change and its impact on water cycle over the upper reach of the Yangtze River[J]. Chin J Geophys, 55(9): 2889-2897 (in Chinese).
- 申双和,盛琼,2008. 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, 66(3): 452-460. Shen S H, Sheng Q, 2008. Changes in pan evaporation and its cause in China in the last 45 years[J]. Acta Meteor Sin, 66(3): 452-460 (in Chinese).
- 石明星,蓝永超,沈永平,等,2018. 1961—2014年黄河源区蒸发皿蒸发量变化的多尺度特征及突变分析[J]. 冰川冻土, 40(4): 666-675. Shi M X, Lan Y C, Shen Y P, et al, 2018. Analyses of multiple time scales characteristics and mutation of pan evaporation variation in the source regions of the Yellow River from 1961 to 2014[J]. J Glaciol Geocryol, 40(4): 666-675 (in Chinese).
- 魏凤英,2007. 现代气候统计诊断与预测技术:第3版[M]. 北京:气象出版社: 13-103. Wei F Y, 2007. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press: 13-103 (in Chinese).
- 肖冰霜,马玉霞,赵天保,等,2016. 基于均一化资料的中国大陆极端温度的长期趋势[J]. 气象, 42(3): 339-346. Xiao B S, Ma Y X, Zhao T B, et al, 2016. Long term trends in extreme temperature over China Mainland based on homogenized dataset[J]. Meteor Mon, 42(3): 339-346 (in Chinese).
- 杨璐,张兵兵,王琪,等,2019. 吉林省蒸发量的时空分布特征[J]. 水土保持研究, 26(1): 197-202. Yang L, Zhang B B, Wang Q, et al, 2019. Spatiotemporal distribution of evaporation in Jilin Province[J]. Res Soil Water Conserv, 26(1): 197-202 (in Chinese).
- 杨司琪,张强,奚小霞,等,2019. 中国夏季风影响过渡区与其他地区蒸发皿蒸发量趋势相反的原因[J]. 大气科学, 43(6): 1441-1450. Yang S Q, Zhang Q, Xi X X, et al, 2019. The reason of

- trends in pan evaporation in the summer monsoon transition region contrary to those of other regions in China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 43(6):1441-1450(in Chinese).
- 于梅, 邢俊江, 于洪敏, 2009. 黑龙江省近 46 年的气温变化[J]. *自然灾害学报*, 18(3):158-164. Yu M, Xing J J, Yu H M, 2009. Air temperature change in Heilongjiang Province in recent 46 years[J]. *J Nat Dis*, 18(3):158-164(in Chinese).
- 于占江, 杨鹏, 2018. 近 40 年京津冀蒸发皿蒸发量变化特征及影响因素[J]. *气象科技*, 46(6):1180-1187. Yu Z J, Yang P, 2018. Variation characteristics of pan evaporation capacity and influencing factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region in recent 40 years[J]. *Meteor Sci Technol*, 46(6):1180-1187(in Chinese).
- 岳元, 申双和, 金宇, 等, 2017. “蒸发悖论”在吉林省的表现及成因分析[J]. *生态学杂志*, 36(7):1993-2002. Yue Y, Shen S H, Jin Y, et al, 2017. Indications and causes of “evaporation paradox” in Jilin Province[J]. *Chin J Ecol*, 36(7):1993-2002(in Chinese).
- 曾燕, 邱新法, 刘昌明, 等, 2007. 1960—2000 年中国蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. *水科学进展*, 18(3):311-318. Zeng Y, Qiu X F, Liu C M, et al, 2007. Changes of pan evaporation in China in 1960—2000[J]. *Adv Water Sci*, 18(3):311-318(in Chinese).
- 张嘉琪, 任志远, 2014. 1977—2010 年柴达木盆地地表潜在蒸散时空演变趋势[J]. *资源科学*, 36(10):2103-2112. Zhang J Q, Ren Z Y, 2014. Analysis on surface spatiotemporal variation tendency of potential evapotranspiration in Qaidam Basin[J]. *Res Sci*, 36(10):2103-2112(in Chinese).
- 赵慧颖, 田宝星, 宫丽娟, 等, 2017. 近 308 年来大兴安岭北部森林植被气候生产潜力及其对气候变化的响应[J]. *生态学报*, 37(6):1900-1911. Zhao H Y, Tian B X, Gong L J, et al, 2017. Climate-induced potential productivity of forest vegetation during the past 308 years in northern Da Hinggan Mountain region, China[J]. *Acta Ecol Sin*, 37(6):1900-1911(in Chinese).
- 赵景波, 邢闪, 周旗, 2012. 关中平原明代霜雪灾害特征及小波分析研究[J]. *地理科学*, 32(1):81-86. Zhao J B, Xing S, Zhou Q, 2012. Frost and snow disaster and change periods in Guanzhong Plain in Ming Dynasty[J]. *Sci Geogr Sin*, 32(1):81-86(in Chinese).
- 朱海霞, 姜丽霞, 曲辉辉, 等, 2019. 黑龙江省水稻生育阶段极端降水事件时空特征[J]. *气象*, 45(4):522-532. Zhu H X, Jiang L X, Qu H H, et al, 2019. Spatio-temporal distribution of extreme precipitation events during growing season of rice in Heilongjiang Province[J]. *Meteor Mon*, 45(4):522-532(in Chinese).
- 朱红蕊, 刘赫男, 张洪玲, 等, 2013. 1971—2010 年黑龙江省蒸发量气候变化特征[J]. *气象与环境学报*, 29(3):63-68. Zhu H R, Liu H N, Zhang H L, et al, 2013. Climatic characters of evaporation from 1971 to 2010 in Heilongjiang Province[J]. *J Meteor Environ*, 29(3):63-68(in Chinese).
- 庄晓翠, 张林梅, 李海花, 2010. 新疆阿勒泰地区 20 cm 蒸发皿蒸发量的变化特征[J]. *中国农业气象*, 31(1):53-58, 64. Zhuang X C, Zhang L M, Li H H, 2010. Change characteristic of 20 cm pan evaporation in Aletai, Xinjiang[J]. *Chin J Agrometeorol*, 31(1):53-58, 64(in Chinese).
- 左洪超, 鲍艳, 张存杰, 等, 2006. 蒸发皿蒸发量的物理意义、近 40 年变化趋势的分析和数值试验研究[J]. *地球物理学报*, 49(3):680-688. Zuo H C, Bao Y, Zhang C J, et al, 2006. An analytic and numerical study on the physical meaning of pan evaporation and its trend in recent 40 years[J]. *Chin J Geophys*, 49(3):680-688(in Chinese).
- Burn D H, Hesch N M, 2007. Trends in evaporation for the Canadian prairies[J]. *J Hydrol*, 336(1-2):61-73.
- Chahine M T, 1992. The hydrological cycle and its influence on climate[J]. *Nature*, 359(6394):373-380.
- Chattopadhyay N, Hulme M, 1997. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change[J]. *Agr For Meteorol*, 87(1):55-73.
- Cohen S, Ianetz A, Stanhill G, 2002. Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964—1998[J]. *Agr For Meteorol*, 111(2):83-91.
- Liu B, Ma Z G, Xu J J, et al, 2009. Comparison of pan evaporation and actual evaporation estimated by land surface model in Xinjiang from 1960 to 2005[J]. *J Geogr Sci*, 19(4):502-512.
- Liu X M, Zheng H X, Zhang M H, et al, 2011. Identification of dominant climate factor for pan evaporation trend in the Tibetan Plateau[J]. *J Geogr Sci*, 21(4):594-608.
- Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y, 1995. Evaporation losing its strength[J]. *Nature*, 337(6551):687-688.
- Roderick M L, Farquhar G D, 2002. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. *Science*, 298(5597):1410-1411.
- Zhao H Y, Gong L J, Qu H H, et al, 2016. The climate change variations in the northern Greater Khingan Mountains during the past centuries[J]. *J Geogr Sci*, 26(5):585-602.
- Zhao Q, Zou C H, Wang K F, et al, 2019. Spatial and temporal distribution characteristics of drought and its influencing factors in Heilongjiang Province, China from 1956 to 2015[J]. *Appl Ecol Environ Res*, 17(2):2631-2650.