

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221243

1980~2020年黑龙江省降水量时空变化特征

陈 蕾^{1a,1b,2}, 戴长雷^{1a,1b,2}, 于成刚^{1a,3}, 王润蒲^{1a,1b,2}

(1. 黑龙江大学 a. 寒区地下水研究所; b. 水利电力学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 黑龙江大学-俄科院西伯利亚冻土所寒区水文与水利工程中俄联合实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 黑龙江省大兴安岭水文水资源分中心, 黑龙江 大兴安岭地区 165000)

摘要:为探讨黑龙江省年降水量时空变化及降水场的类型,采用 Mann-Kendall 检验法、EOF 分解法、Morlet 小波分析等现代气候统计诊断中常用方法分析了 1980~2020 年黑龙江省降水量时空变化特征。结果表明,1980~2020 年黑龙江省降水倾向率为 15.52 mm/10a,即降水量有明显上升趋势,夏季降水量约占全年的 65%,冬季仅占 3%;受地形和气候的影响,黑龙江省降水量表现出显著的空间差异,整体表现为南部和中部的降水量较大,东部次之,西部和北部小;根据 EOF 分解,黑龙江省降水共分为 3 种模态 6 种降水场,其中第 1 模态表明全省降水偏多或偏少;第 2 模态表明省内中部和东北部降水偏多,西南部和大兴安岭地区降水偏少或相反,第 3 模态表明省内西南部降水偏多,东南部和大兴安岭地区降水偏少或相反;黑龙江省降水量存在 11~30.3~7 年两种尺度变化周期,28 年为第一主周期。

关键词: 年降水; EOF 分解; 小波分析; 黑龙江省

中图分类号: TV125

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)04-0005-04

1 引言

降水时空变化会影响区域内的生态环境、水循环、生产生活,因此对水资源进行调控,推动人水和谐发展有重要意义^[1]。近几年很多采用统计分析方法分析各区域内的降水量时空变化,如于本金等^[2]采用统计分析探讨了内蒙古自治区的降水量的变化趋势、周期、突变及时空变化;凌敏华等^[3]基于统计分析研究了中国粮食生产核心区——河南省降水量的变化趋势、周期、突变点,并引入重心模型分析降水重心分布特征;任建成等^[4]采用经验正交函数分析方法(EOF)和小波分析研究山东省降水量时空分布及周期变化。黑龙江省总面积为 $47.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 该省西北部、北部、东南部多为山地(如大兴安岭、小兴安岭),东北部、西部则为三江平原与松嫩平原,因此其地势西北、北和东南侧偏高,东北、西南侧较低。黑龙江省包括黑龙江、松花江、嫩江等水系,且湖泊众多,水资源较丰富。但由于黑龙江省纬度高且受季风影响显著,省内降水不均匀系数较高,主要集

中在夏季,可占到全年的 2/3 以上,易发生洪涝灾害,而冬季的降水量仅有 1%~5%。目前对黑龙江省的研究大部分集中于利用统计分析探讨降水量的变化趋势、突变点降水量时空规律^[5,6],但对时空变化规律表达并不直观且周期性的研究较少。因此,本文基于黑龙江省 33 个气象站数据,分析降水量时空与周期性变化,以对水资源合理调控及保障粮食生产提供参考。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

选取中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)黑龙江省国家基准、基本地面气象观测站逐日降水数据,对于缺测年份较多的站点进行删减,最后选取了 1980~2020 年 33 个气象站的数据并累积得到年降水量数据。

2.2 研究方法

2.2.1 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 趋势检验法为一种非参数统计检验方法,也被称为无分布检验,即无需检验时

收稿日期: 2022-06-14, **修回日期:** 2022-07-12

基金项目: 黑龙江省水利厅科技项目(HSKY201317);黑龙江省水文局科技项目(2014230101000811)

作者简介: 陈蕾(1997-),女,硕士研究生,研究方向为水文学及水资源,E-mail:hss_chenlei@126.com

通讯作者: 戴长雷(1978-),男,博士、教授,研究方向为水利工程,E-mail:daichanglei@126.com

不要求样本是否符合某种分布,少数异常值也并不会干扰结果^[7],近年来在分析气候因素的时间序列变化趋势中应用广泛^[8,9]。

2.2.2 经验正交函数(EOF)

经验正交函数分析方法(EOF)原理是通过矩阵数据中的结构特征分析来提取特征向量,该方法不受站点限制、能快速展开收敛,其计算公式见文献^[10]。

2.2.3 Morlet 小波分析

Morlet 小波分析法采用的是一种窗口大小可变、位置可动的变窗进行谱分析,具有多分辨率分析的特点^[11],从而满足了信号和时频局部化的要求,因此可将其应用在多时间尺度分析中。

3 黑龙江省年降水量时空变化特征

3.1 时间变化特征分析

3.1.1 降水量季节变化特征

黑龙江省年降水量由高到低季节分布为夏、秋、春、冬,四季降水量均有上升趋势。41 年间夏季平均降水量约为 348.27 mm,约占全年的 65%,降水量波动较小,秋季降水量与春季较接近,占全年的 17%,冬季平均降水量为 15.92 mm,仅为全年的 3%。

3.1.2 降水量年份变化特征

统计分析黑龙江省 1980~2020 年降水量变化及其累积距平结果(图 1),发现黑龙江省 1980~2020 年的年平均降水量约为 536 mm,且多寡交替明显,降水倾向率为 15.52 mm/10a,研究时段内年降水量最大值、最小值分别为 2020 年(746.48 mm)、2001 年(381.29 mm),1998 年降水量开始减少,1999~2002 年的年降水量均低于年均值,2003 年降水量又减少,2004~2008 年降水量小于年均值,2011 年降水量开始增加,在 2011~2020 年间,仅 2017 年降水量低于年均值。降水量累积距平从 1998 年后大致呈下降趋势,在 2011 年降至最低点,2012~2020 年呈上升趋势,结合 M-K 检验和累积距平结果,年降水量在 2011 年发生突变。

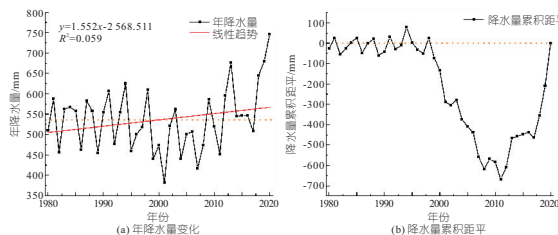


图 1 黑龙江省 1980~2020 年降水量变化及其累积距平
Fig. 1 Changes in precipitation and its cumulative distance from 1980 to 2020 in Heilongjiang Province

3.2 降水量空间变化规律

3.2.1 降水量空间分布

基于 ArcGIS 软件,运用克里金插值法展示气象站点的年降水量空间分布特征,黑龙江省降水量表现出显著的空间差异,整体呈中南较大,东部次之,西部和北部小的特点(图 2)。其中,位于黑龙江省中南部的尚志市年降水量最大,达 672.4 mm,其次为处于小兴安岭迎风坡的铁力市,降水量达 647.9 mm,而位于松嫩平原的齐齐哈尔市年降水量仅为 414.7 mm。

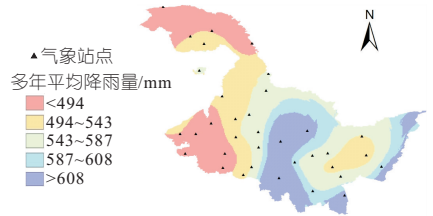


图 2 黑龙江省多年平均降水量及气象站点分布

Fig. 2 Average annual precipitation and distribution of meteorological stations in Heilongjiang Province

3.2.2 年降水量 EOF 分解时空特征

采用经验正交函数(EOF)对黑龙江省 1980~2020 年的年降水量进行时空分解,同时采用 North 进行显著性检验(North 准则通过显著性检验的标准是分解后模态的特征根误差上下限范围不能存在重叠区间)。经过 EOF 分解,前 7 个模态的累积方差贡献率为 79.44%(表 1),且前三个模态符合显著性检验要求,累积方差贡献率为 64.54%,因此前三个特征值可较好地解释黑龙江省的降水时空分布特征。具体分析为:①第 1 模态。特征值方差贡献率远高于其他模态,为 46.62%,在黑龙江省降水量时空分布中起主导作用,第 1 模态所有特征值均为正数(图 3(a)),这表明黑龙江省各站点的降水量变化趋势具有高度的一致性,即降水量在区域内均为偏多或偏少分布。研究区内受小兴安岭山脉和张广才岭地形影

表 1 黑龙江省年降水量 EOF 分解前 7 个特征向量方差贡献率

Tab. 1 Variance contribution of the first seven eigenvectors of EOF decomposition of annual precipitation in Heilongjiang Province

模态	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%	特征根误差范围	
				下限	上限
1	220 368.90	46.62	46.62	166 117.838 10	274 620.00
2	54 769.99	11.59	58.21	41 286.551 16	68 253.43
3	29 910.01	6.33	64.54	22 546.676 95	37 273.35
4	21 409.06	4.53	69.07	16 138.516 61	26 679.61
5	18 294.76	3.87	72.94	13 790.901 80	22 798.62
6	15 678.17	3.33	76.25	11 818.473 48	19 537.87
7	15 073.32	3.19	79.44	11 362.528 84	18 784.12

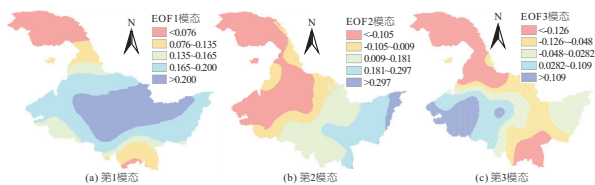


图 3 第 1、2、3 模态特征向量分布

Fig. 3 Distribution of the first, second and third modal eigenvector

响的中部地区和受台风雨影响的南部地区是第 1 模态特征值向量的高值中心,低值中心位于大兴安岭地区和东南部的边缘地区。②第 2 模态。特征值方差贡献率为 11.59%,降水量大致呈东、西反位相分布型(图 3(b)),降水场的正值中心位于黑龙江省东北部和中部地区,低值中心位于大兴安岭地区和西南地区。第 2 模态的特征值向量有正值和负值,这表示省内存在两种降水模态,即东北部和中部降水量偏多,西南地区和大兴安岭地区降水量偏少,即偏多和偏少共存。③第 3 模态。特征值方差贡献率为 6.33%,也是黑龙江省比较重要的降水场分布型,第 3 模态同样也存在偏多和偏少共存的降水场空间分布型,高值中心位于西南部,表示降水量变化较大,低值中心位于西北部和东南部(图 3(c))。

通过 EOF 分解后的黑龙江省降水量空间模态分析可知,省内存在 6 种降水场分布形式,其中,第 1 模态决定全省降水偏多或偏少;第 2 模态决定省内中部和东北部降水偏多,西南部和在大兴安岭地区降水偏少或中部和东北部降水偏少,西南部和在大兴安岭地区降水偏多;第 3 模态决定省内西南部降水偏多,东南部和在大兴安岭地区降水偏少或在大兴安岭地区和东南部降水偏多,西南部降水偏少。

特征向量空间分布模态的时间变化特征可用对应的时间系数表现,时间系数大于 0 时表示与分析的空间模态变化为同一方向,小于 0 则表示相反,且绝对值越大表示模态越具有典型性。根据时间系数绝对值对各模态各年降水情况进行划分,结果见表 2。

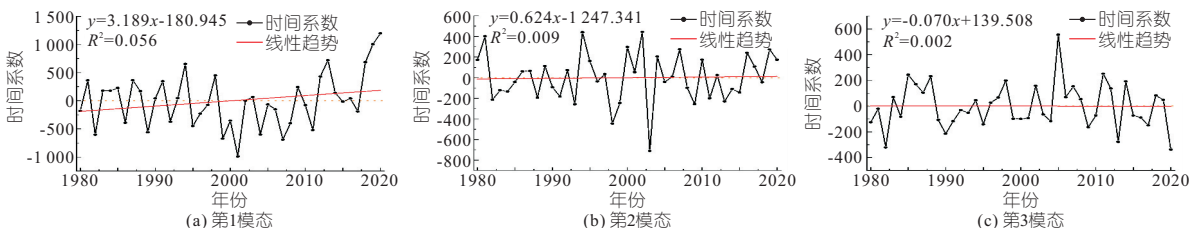


图 4 EOF 分析法中前三个特征向量的时间系数

Fig. 4 Time coefficients of the first three eigenvectors in EOF analysis method

表 2 EOF 分析 6 种降水场表现类型年份分布

Tab. 2 Distribution of six precipitation field performance types by year for EOF analysis

模态	时间系数	降水特征	主要年份
第 1 模态	正	全省偏多	1983、1984、1987、1991、1994、1998、2012、2013、2018、2019、2020
	负	全省偏少	1980、1982、1986、1989、1992、1995、1996、1997、1999、2000、2001、2004、2006、2007、2008、2011、2017
第 2 模态	正	东北部、中部偏多,大兴安岭、西南部偏少	1981、2002、2010、2016
	负	东北部、中部偏少,大兴安岭、西南部偏多	1993、2003、2009、2015
第 3 模态	正	西南部偏多,大兴安岭地区、东南部偏少	1985、1986、1988、2005
	负	西南部偏少,大兴安岭地区、东南部偏多	1990

由表 2 可知,第 1 模态降水场分布模式是黑龙江省主要的降水场形式有 28 年,占 68.3%,其时间系数线性趋势为上升(图 4(a)),这表明黑龙江省 41 年来降水量有增加趋势;第 2 模态降水场分布模式有 8 年,占 19.5%,其时间系数呈线性上升趋势(图 4(b)),说明在 41 年间黑龙江省东北部和中部降水量有增加趋势,西南部和在大兴安岭地区降水有减少趋势;第 3 模态有 5 年,占 12.2%,其时间系数呈线性下降趋势(图 4(c)),这说明在 41 年间西南部降水量有减少趋势,东南部降水量有增加趋势。

3.3 降水量周期性变化特征

采用 Morlet 小波分析研究黑龙江省降水量,以揭示降水量的周期性规律。小波变换系数的实部中包含在给定的时间和尺度下信号的强度和位相信息^[12],所以由小波系数实部等值线图可判断在不同时间尺度上降水未来的变化趋势。小波变化系数实部为正值时表示降水量偏多,负值表示偏少,0 表示突变点^[13]。年降水量小波方差图可表现出能量波动的情况,因此可通过其判断降水量的主周期。

黑龙江省降水量有较明显的丰—枯交替变化(图 5),在 11~30 年存在年代变化周期,在 3~7 年存在年际变化周期,正负相位变化较明显,且在全域具有一致性。省内降水量变化周期存在三个

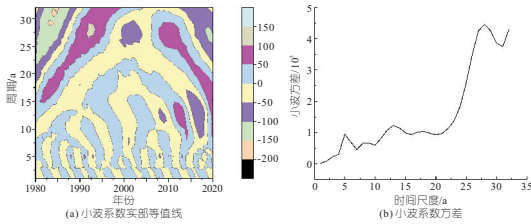


图 5 黑龙江省年降水小波系数实部等值线及小波系数方差

Fig. 5 Real part contours of annual precipitation wavelet coefficients and wavelet coefficient variance in Heilongjiang Province

峰值(图 5),即 5、13、28 年,其中 28 年对应的峰值最大为黑龙江省降水量变化的主周期,降水波动能量最强烈,13 年为第二主周期,5 年为第三主周期,3 个周期的波动控制黑龙江省的年降水周期变化。

4 结论

a. 黑龙江省降水量在 41 年间呈上升趋势,夏季降水量最多、冬季最少,降水量存在 3~7、11~30 年两种尺度周期,28 年为第 1 主周期,变化最强烈。

b. 黑龙江省降水量存在显著的空间差异,整体表现为中南部偏大,东部次之,西部和北部偏小。

c. 经过 EOF 分解,黑龙江省降水场具有 3 种模态,第 1 模态表明全省的降水具有一致性;第 2 模态表明省内中部、东北部和大兴安岭地区、西南部呈反相位变化;第 3 模态表明省内西南部和大兴安岭地区、东南部呈反相位变化。

d. 本文重点基于 EOF 分解法对黑龙江省降水量进行时空变化分析,但并未结合气候变化,且对变化原因也未进行深入探讨,有待进一步研究。

Spatial and Temporal Variation Characteristics of Precipitation During 1980-2020 in Heilongjiang Province

CHEN Lei^{1a,1b,2}, DAI Chang-lei^{1a,1b,2}, YU Cheng-gang^{1a,3}, WANG Run-pu^{1a,1b,2}

(1a. Institute of Cold Groundwater; 1b. School of Hydraulic and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China; 2. Joint Laboratory of Hydrology and Hydraulic Engineering, Siberian Frozen Soil Institute, Heilongjiang University-Russian Academy of Science, Harbin 150080, China; 3. Heilongjiang Daxing'anling Hydrological and Water Resources Sub-Center, Daxing'anling 165000, China)

Abstract: In order to explore the temporal and spatial variation of annual precipitation and the type of precipitation field in Heilongjiang Province, this paper analyzed the precipitation of Heilongjiang Province from 1980 to 2020 using the Mann-Kendall test method, EOF decomposition method, Morlet wavelet analysis and other methods commonly used in modern climate statistical diagnosis. The results show that the precipitation tendency rate in Heilongjiang Province from 1980 to 2020 is 15.52 mm/10 a, that is, the precipitation has a significant upward trend. The precipitation in summer accounts for about 65% of the whole year, and only 3% in winter; Under the influence of topography and climate, precipitation in Heilongjiang Province showed significant spatial differences. As a whole, the south and central regions have higher precipitation, followed by the east, and the west and north regions have lower precipitation. According to the EOF decomposition, the precipitation in Heilongjiang Province can be divided into three modes and six precipitation fields: the first mode indicates that the precipitation in Heilongjiang province is more or less; The second mode showed that the central and northeastern parts of the province had more precipitation, while the southwest and Greater Khingan Mountains had less or opposite precipitation. The third mode showed that the precipitation was higher in the southwest of the province, and less or opposite in the southeast and Greater Khingan Mountains. There were two scale variation cycles of precipitation in Heilongjiang Province, 11-30 a and 3-7 a, with 28 a as the first main cycle.

Key words: annual precipitation; EOF decomposition; wavelet analysis; Heilongjiang Province

参考文献:

- [1] 付新荣. 海城市降水量时空变化分析[J]. 水土保持应用技术, 2022(1):34-36.
- [2] 于本金, 春喜. 近 60 a 来内蒙古降水量时空变化分析[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2022, 51(3):221-228.
- [3] 凌敏华, 韩洪宝. 1960~2018 年河南省降水时空变化特征及重心[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(17):7008-7016.
- [4] 任建成, 王峰, 卢晓宁. 基于 EOF 和小波分析的山东省年降水时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2):179-183.
- [5] 韩玉梅. 黑龙江省年降水量时空分布分析[J]. 黑龙江水利科技, 2008(3):4-5.
- [6] 王秀芬, 杨艳昭, 尤飞. 近 30 年来黑龙江省气候变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(增刊 1):28-32.
- [7] 叶磊, 周建中, 曾小凡, 等. 水文多变量趋势分析的应用研究[J]. 水文, 2014, 34(6):33-39.
- [8] IHIMEKPEN N I, ILABOYA I R, AWAH L O. Non-parametric Mann-Kendall test statistics for rainfall trend analysis in some selected states within the coastal region of Nigeria[J]. Journal of civil, construction and environmental engineering, 2018, 3(1):17-28.
- [9] 喻乙耽, 马振峰, 范广洲. 华西秋雨气候特征分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2018, 33(2):164-176.
- [10] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 第 2 版. 北京:气象出版社, 2007.
- [11] 朱希安, 金声震, 宁书年. 小波分析的应用现状及展望[J]. 煤田地质与勘探, 2003(2):51-56.
- [12] YA-NING C, WEI-HONG L I, CHANG-CHUN XU, et al. Effects of climate change on water resources in Tarim River Basin, Northwest China[J]. Journal of environmental sciences, 2007, 19(4):488-493.
- [13] 胡安焱, 郭生练, 陈华, 等. 基于小波变换的汉江径流量多时间尺度分析[J]. 人民长江, 2006(11):61-62, 89.