

张硕, 邓博文, 许瑶瑶, 等. 2020. 1958~2019 年漠河市气温及降水突变分析 [J]. 气候与环境研究, 25(6): 667–676. ZHANG Shuo, DENG Bowen, XU Yaoyao, et al. 2020. Abrupt Change of Temperature and Precipitation in Mohe of China from 1958 to 2019 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (6): 667–676. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20022

1958 ~ 2019 年漠河市气温及降水突变分析

张硕¹ 邓博文¹ 许瑶瑶¹ 赵俊芳² 侯美亭³
郭跃东⁴ 靳少非⁵ 郑德祥¹

1 福建农林大学林学院, 福州 350000

2 中国气象科学研究院/灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 中国气象局干部培训中心, 北京 100081

4 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

5 闽江学院海洋学院地理科学系, 福州 350108

摘要 采用集合经验模分解 (ensemble empirical mode decomposition, EEMD) 以及滑动 t 检验方法, 基于漠河市 1958~2019 年逐日气温及降水数据, 对其进行了趋势及突变分析。结果表明, 漠河市日平均温度年平均整体呈增温趋势, EEMD 非线性增温速率为 $0.43^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$, 滑动 t 检验显示漠河市近 60 年来年均温突变时间点为 20 世纪 80 年代中后期; 漠河市日最高温度年平均呈增温趋势, EEMD 非线性增温速率为 $0.61^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$, 滑动 t 检验显示漠河市近 60 年来日最高温年平均突变时间点为 20 世纪 80 年代中后期; 漠河市日最低温年平均变化趋势为先增加后减小, 整体呈增温趋势, EEMD 非线性增温速率为 $0.21^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$, 滑动 t 检验显示漠河市近 60 年来日最低温年平均突变时间点为 20 世纪 80 年代前中期和 20 世纪 90 年代中后期。漠河市年降雨量、夜间年降雨量和白天年降雨量均呈先减后增的变化趋势, 且增加幅度远高于减小幅度, 整体呈增加趋势, EEMD 非线性降雨量增加速率分别为 $14.05\text{ mm} (10\text{ a})^{-1}$ 、 $7.71\text{ mm} (10\text{ a})^{-1}$ 和 $5.12\text{ mm} (10\text{ a})^{-1}$, 滑动 t 检验显示漠河市近 60 年来年降雨量、夜间年降雨量和白天年降雨量均不存在时间突变点; EEMD 和线性趋势分析均表明漠河市近 60 年来气温和降水都均呈增加趋势, 但前者增加速率远高于后者, 说明传统的线性趋势分析可能会低估漠河市的气温及降水的增加趋势。

关键词 气温 降水 漠河市 集合经验模分解 (EEMD) 滑动 t 检验

文章编号 1006-9585(2020)06-0667-10

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20022

Abrupt Change of Temperature and Precipitation in Mohe of China from 1958 to 2019

ZHANG Shuo¹, DENG Bowen¹, XU Yaoyao¹, ZHAO Junfang², HOU Meiting³,
GUO Yuedong⁴, JIN Shaofer⁵, and ZHENG Dexiang¹

1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350000

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences/State Key Laboratory of Severe Weather, Beijing 100081

3 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

收稿日期 2020-02-28; 网络预出版日期 2020-08-23

作者简介 张硕, 男, 1997 年出生, 硕士, 主要从事森林生态与气候变化研究。E-mail: forestmanagements@163.com

通讯作者 郑德祥, E-mail: fjzdx@126.com

资助项目 国家自然科学基金 41701099、41571097, 福建农林大学科技创新专项基金项目 KFA17063A

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41701099 and 41571097), Special Fund for Science and Technology Innovation of Fujian Agriculture and Forestry University (Grant KFA17063A)

4 Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102

5 Department of Geography, College of Oceanology, Minjiang University, Fuzhou 350108

Abstract A multiscale examination of temperature and precipitation in Mohe from 1958 to 2019 was performed using the Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) method and the sliding average t -test method. The results showed that the annual average temperature in Mohe increased by $0.43^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$ with the mid and late 1980s as the abrupt change points. The daily maximum temperature increased by $0.61^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$ with the mid and late 1980s as the abrupt change points, while the daily minimum temperature increased by $0.21^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$ with the early to mid 1980s and late 1990s as the multiple abrupt change points. Furthermore, the rainfall, nighttime rainfall, and daytime rainfall showed a similar change pattern from 1958 to 2019. The trend in the three types of rainfall obtained by EEMD was $14.05 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$, $7.71 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$, and $5.12 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$, respectively. No abrupt change points were detected for all types of precipitation. Both the EEMD and the linear trend analysis found an increase in temperature and precipitation, while the trends obtained by EEMD were greater than that by the linear method, which implies that the traditional linear analysis method underestimates the trends in temperature and precipitation in Mohe.

Keywords Air temperature, Precipitation, Mohe, Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD), Sliding average t -test

1 引言

由人类活动所主导的气候变化不仅影响到人类赖以生存的环境,还可对世界各国的经济发展、社会进步产生深刻的影响,已是世界面临的最大挑战之一 (IPCC, 2013; Zhang and Pan, 2016)。研究气温和降水的变化规律是探讨气候变化影响的主要手段之一 (高弋斌等, 2019; 田立鑫等, 2019; 汪飞等, 2020)。多年冻土约占全球总面积的 20%, 其封存的碳含量约为大气碳总量的 2 倍, 属于气候变化敏感区域, 特别是对于气温的升高尤其敏感。气候变暖已导致冻土大面积退化, 而冻土退化所释放的土壤碳可分解成 CO_2 等温室气体, 预计可使全球温度在 2300 年增加 0.42°C , 可进一步加剧气候变暖 (Biskaborn et al., 2019), 因此, 有必要加强对冻土区域气候变化的研究与分析。

东北地区是中国冻土分布的主要区域, 也是中国增温趋势最为显著的地区, 其中大兴安岭是东北地区增温幅度变化较大的地区之一 (陈珊珊等, 2018)。大兴安岭地区漠河市是中国最北、纬度最高、气温最低的地区, 也是我国高纬度连续多年冻土主要分布区域。随着全球气候变暖, 气温及降水的增加最终将导致漠河市多年冻土全部退化, 也会使白桦逐渐取缔该区域原生树种兴安落叶松, 进而对该区域的生态系统产生巨大的影响。

目前已有不少学者对漠河市气候变化做了一定的研究。如桂翰林等 (2009) 得出近几十年漠河市

平均气温和降水量均呈增加趋势, 而王春红等 (2009) 认为年、季节持续冷暖日的变化是影响漠河市年均温升高的主要因素。上述研究方法大多以线性拟合为主, 且并未对该地区长时间序列气温及降水的突变趋势进行研究分析。因此, 本文在前人的基础上, 采用集合经验模分解 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD) 和滑动 t 检验的方法对漠河气象站 1958~2018 年逐日气象资料分析该区域气温和降水的变化趋势、突变特征, 旨在探索全球变暖背景下漠河市近 60 年来气温和降水的变化规律, 以期为我国高纬度多年冻土区适应气候变化提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 研究数据

漠河气象站 (52.58°N , 122.31°E , 海拔 433 m) 地处黑龙江省大兴安岭地区漠河市, 是我国纬度最高的气象站, 始建于 1957 年。本研究中漠河市的气温资料来源于中国国家气象信息中心提供的逐日的气温 (包括日最高温度、日最低温度、日平均温度) 与降水数据 (降雨量、白天降雨量、夜间降雨量)。本研究采用的时间序列为 1957 年 4 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日。

2.2 研究方法

长时间序列的气温及降水变化以非线性和非平稳为主, 且其趋势变化与周期震荡往往会混合在一

起, 而传统线性趋势分析往往不能准确地分辨, 进而导致其不能反映气候真实变化趋势, 鉴于此, 本文采用 EEMD 可自适应提取各个本征模态, 能更好地提取长时间序列趋势变化信息, 尤其是 EEMD 趋势项所得到的非线性变化趋势能反映气候真实的变化趋势 (李慧群和付遵涛, 2012; Xia et al., 2013)。EEMD 是经验模分解 (EMD) 方法的改进版。EMD 可将序列分解为不同时间序列的平稳序列特征, 进而从原始序列中提取不同时间尺度的波动, 即本征模态 (Intrinsic Mode Function, IMF) 和趋势项, 计算原理可见 Wu and Huang (2009), 目前已广泛用于气象学 (段丽瑶等, 2014; 从靖等, 2017; 罗那那等, 2017; 刘濛濛和隆永兰, 2019; 刘晓琼等, 2019)。为克服 EMD 中模态混合问题, 使分析结果更贴合实际, 本研究 EEMD 在计算中对原始数据加入一定比例的白噪音信号, 并在多次计算后, 做集合平均, 集合平均次数为 1000 次, 添加白噪音信号为合成序列标准差的 20%。同时使用已广泛用于气象学滑动 t 检验方法进行气候突变检测 (李珍和姜逢清, 2007; 于泽兴等, 2017; 高慧等, 2019)。

本论文中所采用的软件为 R (R version 3.5.1) ([https://www.R-project.org/\[2020-02-28\]](https://www.R-project.org/[2020-02-28])), EEMD 计算采用的为 Rlibeemd 包, 绘图由 ggplot2 包完成。

3 结果

3.1 温度变化特征

通过 EEMD 对漠河市的日平均温度年平均、日最高温年平均和日最低温年平均从高频到低频分解后, 共得到 4 个 IMF 分量和一个趋势项。由图 1 和表 1 可知, IMF1、IMF2 与趋势项对原始数据的方差贡献率较高, 累计贡献分别为 83.6%、85.7% 和 73.2%, 即表明漠河市日平均温度年平均、日最高温年平均和日最低温年平均主要由 IMF1、IMF2 以及趋势项所决定, 其中 IMF1 影响最为显著, 且 IMF1 和趋势项均在 0.01 显著性水平下与原始序列呈显著相关性 (图 1 和表 1)。此外, 日最低温年平均的趋势项呈先增后减的变化趋势, 且其增加幅度远高于减小幅度, 整体呈增温, 而日平均温度年平均、日最高温年平均趋势项均呈增加趋势 (图 2)。线性趋势与 EEMD 趋势项的非线性趋

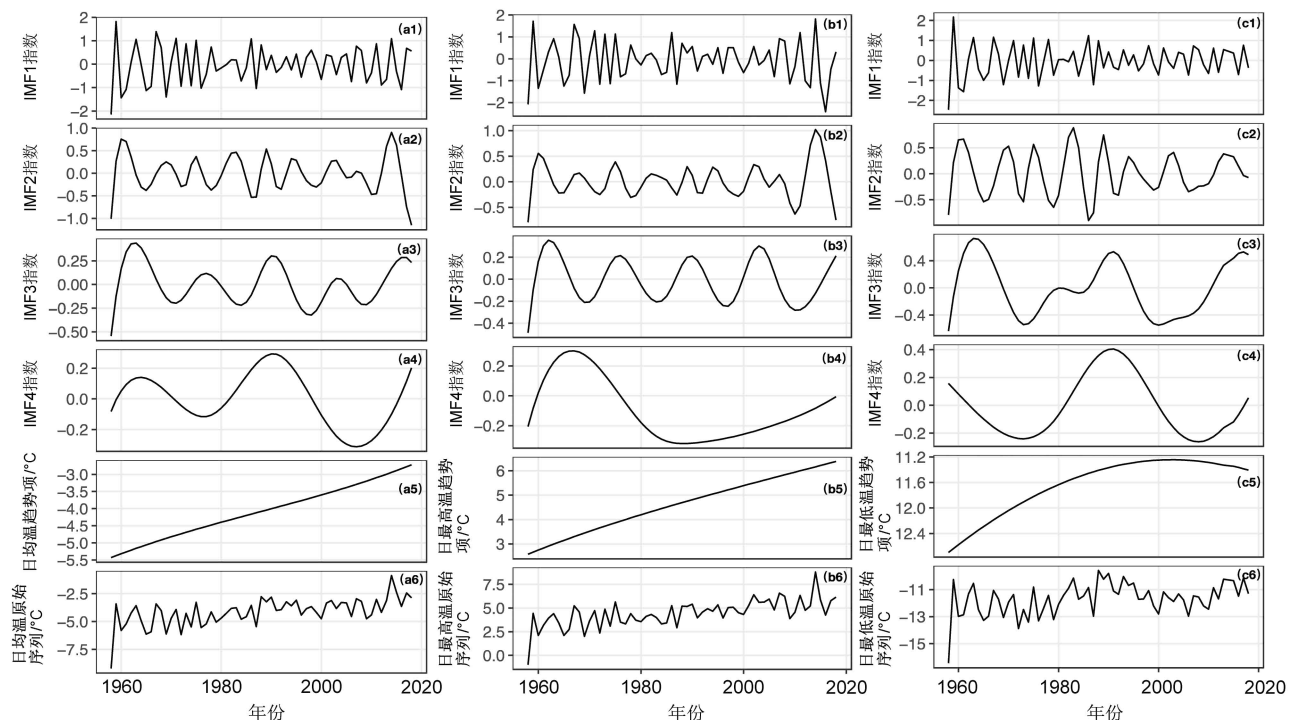


图 1 1958~2019 年漠河市温度序列集合经验模分解 (EEMD): (a1-a6) 日平均温度年平均; (b1-b6) 日最高温度年平均; (c1-c6) 日最低温度年平均

Fig. 1 Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) of temperature in Mohe from 1958 to 2019: (a1-a6) Annual average temperature; (b1-b6) average daily maximum temperature; (c1-c6) average daily minimum temperature

表 1 各 IMF 分量对气温原序列的方差贡献率、与原始温度序列相关系数以及显著性检验结果

Table 1 Variance contribution, coefficient and *P* values for each IMF (intrinsic mode function) of temperature

	EEMD 分量	方差贡献率	与原序列相关系数	<i>P</i> 值
日平均温度年平均	IMF1	0.343	0.741	0.000
	IMF2	0.169	0.311	0.014
	IMF3	0.090	0.257	0.045
	IMF4	0.074	0.006	0.964
	趋势项	0.324	0.599	0.000
日最高温度年平均	IMF1	0.337	0.649	0.000
	IMF2	0.121	0.337	0.007
	IMF3	0.07	0.135	0.301
	IMF4	0.073	-0.257	0.045
	趋势项	0.399	0.665	0.000
日最低温度年平均	IMF1	0.361	0.770	0.000
	IMF2	0.188	0.411	0.002
	IMF3	0.160	0.305	0.022
	IMF4	0.109	0.365	0.006
	趋势项	0.183	0.397	0.002

势均表明日平均温度年平均、日最高温年平均和日最低温年平均整体均呈增温趋势，但后者增温幅度均高于前者，如日最高温年平均非线性增温速率为 $0.61^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ ，是其线性增加速率 $[0.35^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}]$ 的 1.8 倍左右（表 2）。通过采取步长为 10 a 的滑动 *t* 检验进行突变分析，在 0.01 显著水平下结果表明：漠河市近 60 年来日平均温度年平均和日最高温年平均突变时间点均为 20 世纪 80 年代中后期（图 3a 和 3b），而日最低温度年平均突变时间点为 20 世纪 80 年代前期和 90 年代中后期（图 3c）。

3.2 降雨量变化特征

通过 EEMD 对漠河市年降雨量、夜间年降雨量和白天年降雨量从高频到低频分解后，共得到 4 个 IMF 分量和一个趋势项（图 4）。IMF1、IMF2 与趋势项对原始数据的方差贡献率较高，累计贡献分别为 81.6%、77.1% 和 82.6%，即表明漠河市年降雨量、夜间年降雨量和白天年降雨量平均主要由 IMF1、IMF2 以及趋势项所决定，其中 IMF1 影响最为显著（表 3）。年降雨量、夜间年降雨量和白天年降雨量趋势项均呈先减后增的变化趋势，以 20 世纪 70 年中后期为转折点，降水由逐渐减小转为逐渐增加，但整体均呈增加趋势，且其非线性增加速率均高于线性增加速率（图 5），如年降水

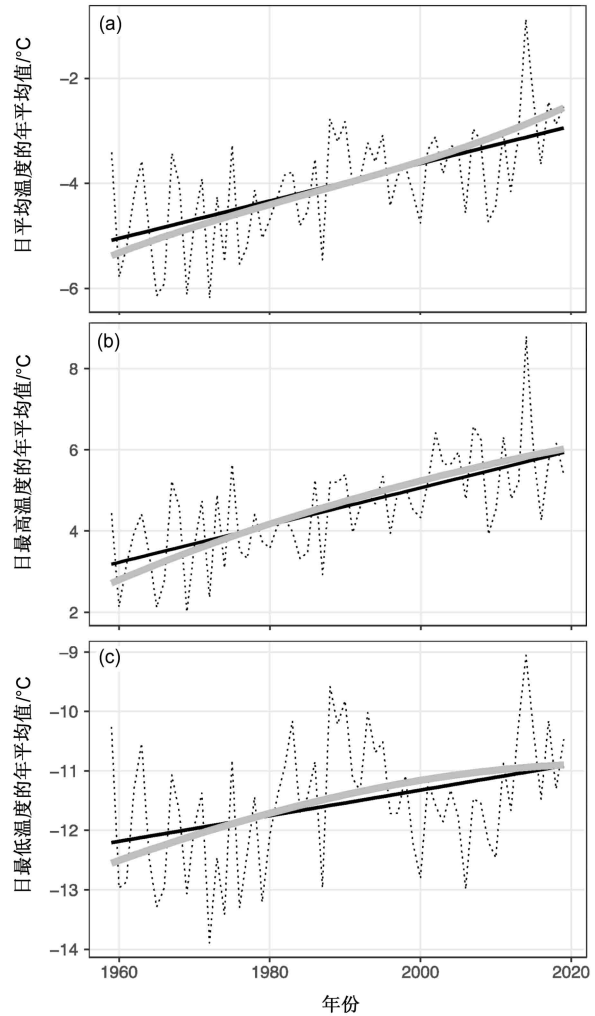


图 2 漠河市 1958~2019 年 EEMD 分解趋势项变化趋势（灰色曲线）与温度线性趋势变化（黑色直线）比较：（a）日平均温度年平均；（b）日最高温度年平均；（c）日最低温度年平均。虚线为原始值

Fig. 2 Comparison on the trends in temperature between the EEMD (gray curve) and the linear trend (black line) in Mohe from 1958 to 2019. (a) Annual average temperature; (b) average daily maximum temperature; (c) average daily minimum temperature. Dashed lines denote raw data

表 2 漠河市 1958~2019 年间 EEMD 分解趋势项温度变化与线性回归温度变化比较

Table 2 Comparison of changes in temperature of EEMD decomposition trend term and linear regression model in Mohe from 1958 to 2019

	温度变化/ $^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$	
	线性回归	EEMD趋势项
日平均温度年平均	0.35	0.43
日最高温度年平均	0.35	0.61
日最低温度年平均	0.18	0.21

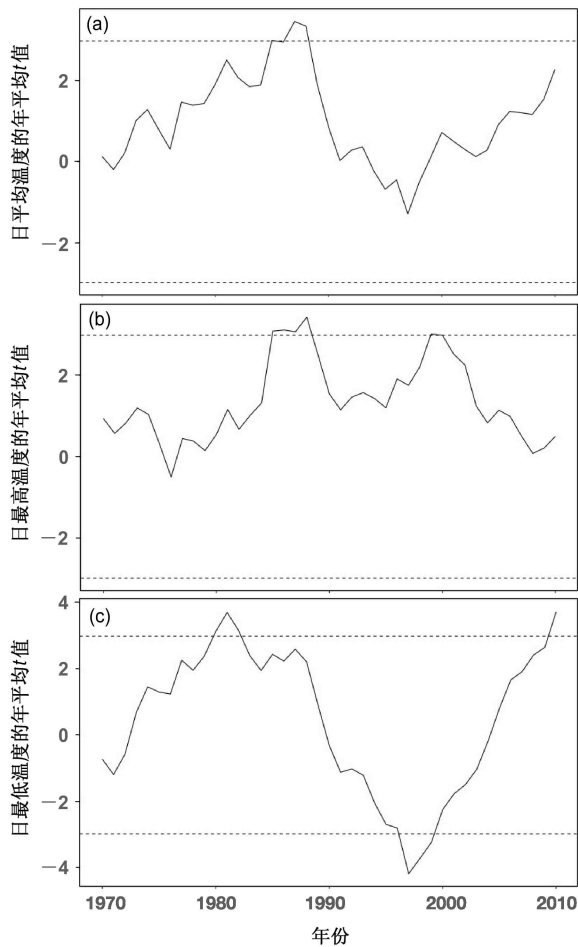


图3 漠河市1958~2019年(a)日平均温度年平均、(b)日最高温度年平均、(c)日最低温度年平均滑动 t 检验

Fig. 3 Sliding average t -test in (a) annual average temperature, (b) average daily maximum temperature, and (c) average daily minimum temperature in Mohe from 1958 to 2019

量非线性增加速率 [$14.05\text{ mm (10 a)}^{-1}$] 是线性 [$11.54\text{ mm(10 a)}^{-1}$] 的 1.2 倍左右 (表 4)。此外, 通过开展步长为 10 a 的滑动 t 检验进行突变分析, 在 0.01 显著水平下结果表明: 漠河市近 60 年来年降雨量、夜间年降雨量和白天年降雨量均不存在突变时间点 (图 6)。

4 结论与讨论

通过 EEMD 方法对漠河市 1958~2019 年的气温及降水数据进行分析, 共得到 4 个 IMF 分量和一个趋势项, 同时使用滑动 t 检验分析方法检验气温及降水突变年份, 主要结论如下:

(1) 漠河市近 60 年来日平均温度年平均温整体呈增温趋势, 且突变时间点 (20 世纪 80 年代中

表 3 各 IMF 分量对降雨原序列的方差贡献率、与原序列相关系数以及显著性检验结果

Table 3 Variance contribution, coefficient and P values for each IMF of rainfall

	EEMD分量	方差贡献率	与原序列相关系数	P 值
年降雨	IMF1	0.414	0.720	0.000
	IMF2	0.205	0.364	0.003
	IMF3	0.075	0.002	0.860
	IMF4	0.109	0.071	0.582
	趋势项	0.197	0.244	0.050
夜间年降雨	IMF1	0.439	0.764	0.000
	IMF2	0.162	0.459	0.000
	IMF3	0.097	0.259	0.04
	IMF4	0.132	0.284	0.002
	趋势项	0.170	0.279	0.002
白天年降雨	IMF1	0.445	0.776	0.000
	IMF2	0.258	0.540	0.000
	IMF3	0.103	0.364	0.020
	IMF4	0.071	0.068	0.619
	趋势项	0.123	0.164	0.056

表 4 漠河市 1958~2019 年间 EEMD 分解趋势项降雨量变化与线性回归降雨量变化比较

Table 4 Comparison of changes in rainfall of EEMD decomposition trend term and linear regression model in Mohe from 1958 to 2019

	降雨量变化/ mm (10 a)^{-1}	
	线性回归	EEMD趋势项
年降雨	11.54	14.05
夜间年降雨	7.07	7.71
白天年降雨	3.83	5.12

后期) 与祁连山地区突变时间点一致 (尹宪志等, 2009), 虽晚于黑龙江省、东北地区气温突变时间点 (周秀杰等, 2013), 但早于青藏高原的突变时间点 1994 年 (徐丽娇等, 2019)。EEMD 趋势项非线性趋势的增温速率 [$0.43^{\circ}\text{C (10 a)}^{-1}$] 远高于桂翰林等 (2009) 采用线性趋势所得到的漠河市平均温增温速率 [$0.32^{\circ}\text{C (10 a)}^{-1}$]。其次, 漠河市增温趋势虽与东北地区年均温变化趋势保持一致, 但其非线性增温速率远高于东北地区及全国年均温增温速率 (董满宇和吴正方, 2008; 高锋和王宝书, 2008; 马冲亚等, 2009; 赵春雨等, 2009)。与中国其他冻土区域相比, 其非线性增温速率高于青藏高原 [$0.28^{\circ}\text{C (10 a)}^{-1}$] 和祁连山 [$0.26^{\circ}\text{C (10 a)}^{-1}$] (尹

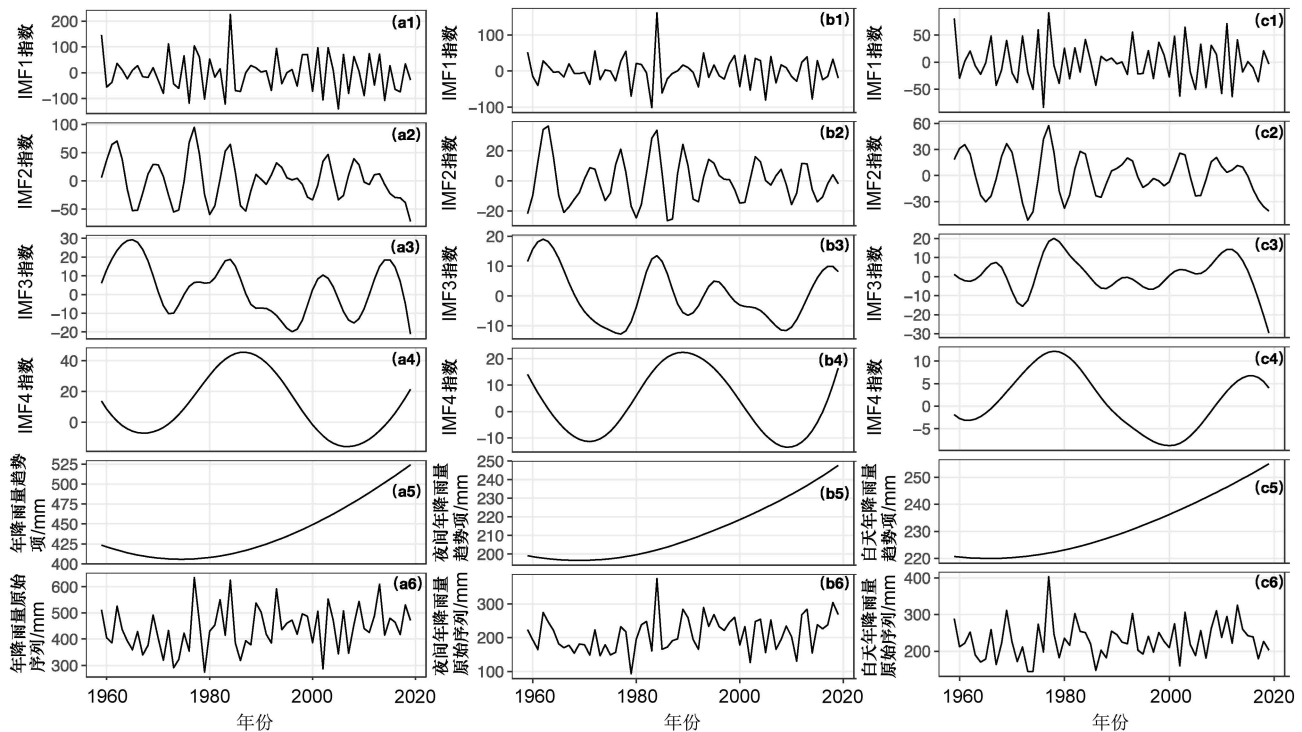


图4 1958~2019年漠河市降水序列 EEMD 分解: (a1-a6) 年降雨量; (b1-b6) 夜间年降雨量; (c1-c6) 白天年降雨量

Fig. 4 EEMD decomposition of the rainfall in Mohe from 1958 to 2019: (a1-a6) Annual rainfall; (b1-b6) annual nighttime rainfall; (c1-c6) annual daytime rainfall

宪志等, 2009; 徐丽娇等, 2019), 这表明高纬度冻土地区的增温趋势更明显。其原因可能是气温变化具有区域异质性, 通常而言, 纬度高的区域极易受到气候变暖的影响, 而漠河市是东北地区乃至全国纬度最高的地区; 其次, 漠河市是我国高纬度连续多年冻土的主要分布区, 而冻土热稳定性差, 急剧增温将加速冻土退化, 导致冻土碳释放, 进而加剧漠河市气候变暖。

(2) 漠河市近 60 年来日最高温度年平均整体呈增温趋势, EEMD 趋势项非线性趋势的结果表明漠河市日最高温度年平均增温速率 $[0.61^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}]$ 高于黑龙江省年均最高温的增温速率 (陈莉等, 2001), 但低于东北地区极端最高温的增温速率 (严晓瑜等, 2012)。此外, 与中国其他冻土区域相比, 其非线性增温速率远高于青藏高原 $[0.25^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}]$ 和祁连山 $[0.20^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}]$ (尹宪志等, 2009; 徐丽娇等, 2019)。漠河市近 60 年来日最高温度年平均突变时间点为 20 世纪 80 年代中后期与黑龙江省及东北地区年均最高温和极端最高温的突变年份基本吻合 (陈莉等, 2001; 朱红蕊和刘赫男, 2011), 但早于青藏高原的突变时间点 1997 年 (徐丽娇等, 2019)。

(3) 漠河市近 60 年来日最低温度年平均呈先增加后减小的变化趋势, 整体呈增温趋势, 但 EEMD 趋势项非线性所得到的增温速率 $[0.21^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}]$ 低于黑龙江省年均最低温的增温速率 (陈莉等, 2001), 但高于东北地区极端最低温的增温速率 (严晓瑜等, 2012)。此外, 与中国其他冻土区域相比, 其非线性增温速率远低于青藏高原 $[0.36^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}]$ 和祁连山 $[0.3^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}]$ (尹宪志等, 2009; 徐丽娇等, 2019)。漠河市近 60 年来日最低温度年平均突变时间点为 20 世纪 80 年代前中期和 90 年代中后期, 其中 20 世纪 80 年代前中期与黑龙江省极端最低温的突变时间点基本相吻合 (朱红蕊和刘赫男, 2011), 而 20 世纪 90 年代中后期日最低温度年平均突变减小原因可能是 1998~2012 年是全球变暖暂缓期, 尤其是在北半球大陆更为显著, 最低温度已由变暖转为变冷的趋势, 而平均温和最高温依然呈变暖趋势。其次, 于中国中高纬地区而言, 大气环流将是影响温度下降的主要因素, 20 世纪 80 年代末北极涛动 (AO) 由强相转为负相, 而西伯利亚高压 (SH)、东亚季风 (EAWM)、东亚槽 (EAT) 和经向风都一直处于强相, 在大气环流

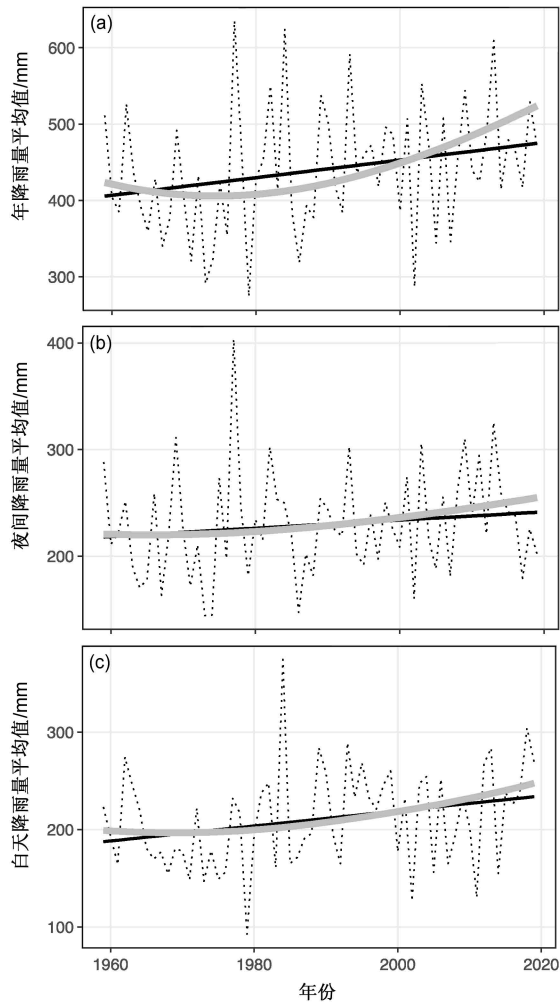


图5 漠河市 1958~2019 年 EEMD 分解趋势项变化趋势 (灰色曲线) 与降水线性趋势 (黑色直线) 变化比较: (a) 年降雨量; (b) 夜间年降雨量; (c) 白天年降雨量。虚线为原始值

Fig. 5 Comparison of changes in rainfall between the EEMD (gray curve) and the linear model (black line) in Mohe from 1958 to 2019: (a) Annual precipitation; (b) annual nighttime precipitation; (c) annual daytime precipitation. Dashed lines denote raw data

因子作用下, 使极低冷空气更容易进入东北地区, 有利于东北地区寒潮的频繁爆发, 进而降低最低温度 (王岱等, 2016; Sun et al., 2018; Zhou et al., 2020)。

(4) 漠河市近 60 年年降雨量、夜间年降雨量以及白天年降雨量均呈先减少后增加的变化趋势, 且其增加的幅度均高于减少的幅度, 整体呈增加趋势, 非线性增加速率分别为 $14.05 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $7.71 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $5.12 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$, 其中年降雨量增加速率略高于黑龙江省 [$9 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$] (顾金普等, 2017), 但与东北地区年降雨量呈下降趋势不一致 (吉奇等, 2006; 孙倩倩和刘晶淼, 2014), 其原因可能是由于降雨量变化具有局域异质性, 如

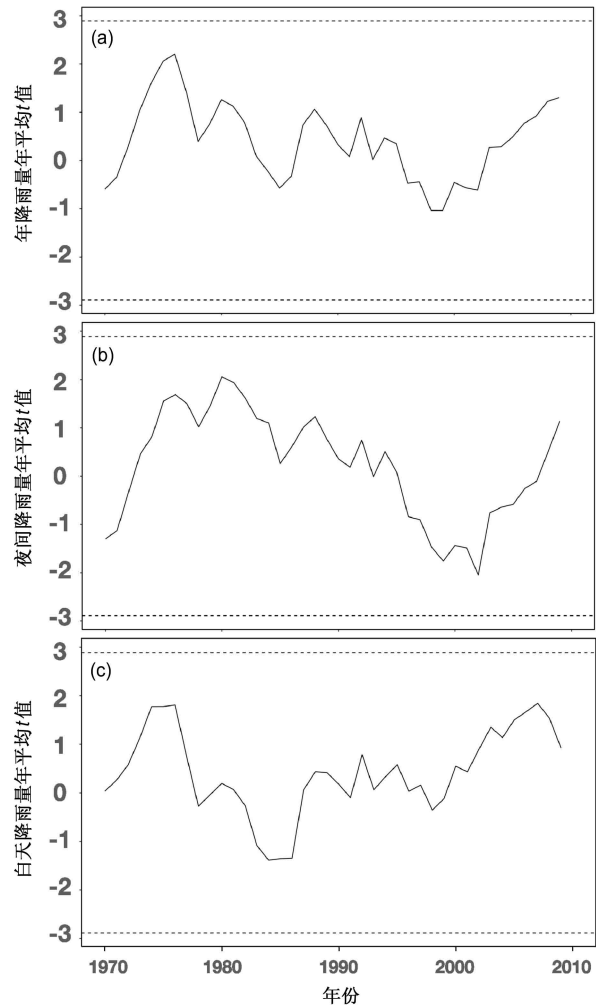


图6 漠河市 1958~2019 年 (a) 年降雨量、(b) 夜间年降雨量、(c) 白天年降雨量滑动 t 检验

Fig. 6 Sliding average t -test in (a) annual precipitation, (b) annual nighttime precipitation, and (c) annual daytime precipitation in Mohe from 1958 to 2019

张可扬等 (2018) 认为东北地区降雨量呈下降趋势, 但大兴安岭地区呈增加趋势; 其次, 冷涡可能也是影响漠河市降雨量增加的主要因素之一, 冷涡可使漠河市出现低温和低湿反气旋, 形成有利于该区域降雨的小气候, 此外, 高纬度地区冷涡活动较强, 有利于孟加拉湾和南海的水汽由南向北输送, 进而增加漠河市降雨量 (Liu et al., 2015)。与中国其他冻土区域相比, 漠河市年降雨量非线性增加速率约为青藏高原 [$4.1 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$]、祁连山 [$4.9 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$] 的 3 倍 (尹宪志等, 2009; 徐丽娇等, 2019), 但漠河市年降雨量、夜间年降雨量和白天年降雨量均不存在突变时间点。

(5) 本文选择漠河市作为我国高纬度多年冻土区典型区域, 研究结果表明漠河市气温与降雨量

整体呈增加趋势, 该增加趋势快于之前所掌握的速率, 这将直接影响我国高纬度多年冻土区的分布。假如按此气温及降水的增加速率进行预测, 未来 100 年内漠河市气温及降水增加幅度将增至 4℃ 和 10%, 可以估计漠河市将由多年连续冻土区退化成岛状冻土区, 进一步导致多年冻土区向北移动, 甚至会造成漠河市冻土全面退化。其次, 大兴安岭地区漠河市林业资源丰富, 气候变暖所引得冻土退化也会对森林群落类型产生一定的影响, 除此之外, 冻土大面积退化还会对公路、铁路和管道等基础设施建设稳定性产生一定的影响。

参考文献 (References)

- Biskaborn B K, Smith S L, Noetzi J, et al. 2019. Permafrost is warming at a global scale [J]. *Nature Communications*, 10: 264. doi:10.1038/s41467-018-08240-4
- 陈莉, 李帅, 王阳. 2001. 黑龙江省气温变化的研究 [J]. *黑龙江气象*, (3): 29–31. Chen Li, Li Shuai, Wang Yang. 2001. A study of temperature variation in Heilongjiang Province [J]. *Heilongjiang Meteorology (in Chinese)*, (3): 29–31. doi:10.3969/j.issn.1002-252X.2001.03.010
- 陈珊珊, 臧淑英, 孙丽. 2018. 东北多年冻土退化及环境效应研究现状与展望 [J]. *冰川冻土*, 40(2): 298–306. Chen Shanshan, Zang Shuying, Sun Li. 2018. Permafrost degradation in Northeast China and its environmental effects: Present situation and prospect [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 40(2): 298–306. doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0034
- 从靖, 赵天保, 马玉霞. 2017. 中国北方干旱半干旱区降水的年代际变化特征及其与太平洋年代际振荡的关系 [J]. *气候与环境研究*, 22(6): 643–657. Cong Jing, Zhao Tianbao, Ma Yuxia. 2017. Multi-decadal variability of precipitation in arid and semi-arid region of Northern China and its relationship with Pacific Decadal Oscillation Index [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 22(6): 643–657. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16036
- 董满宇, 吴正方. 2008. 近 50 年来东北地区气温变化时空特征分析 [J]. *资源科学*, 30(7): 1093–1099. Dong Manyu, Wu Zhengfang. 2008. Analysis of temporal and spatial characteristics of temperature change over the last 50 years in Northeast China [J]. *Resources Science (in Chinese)*, 30(7): 1093–1099. doi:10.3321/j.issn.1007-7588.2008.07.019
- 段丽瑶, 丁一汇, 任雨. 2014. 1921~2010 年天津气温和降水量序列的多尺度分析 [J]. *气候与环境研究*, 19(4): 515–522. Duan Liyao, Ding Yihui, Ren Yu. 2014. Multiscale examination on the temperature and precipitation series in Tianjin during 1921–2010 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 19(4): 515–522. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13020
- 高峰, 王宝书. 2008. 全球变暖与东北地区气温变化研究 [J]. *海洋预报*, 25(1): 25–30. Gao Feng, Wang Baoshu. 2008. A study on global warming and the temperature changes in the Northeast region [J]. *Marine Forecasts (in Chinese)*, 25(1): 25–30. doi:10.3969/j.issn.1003-0239.2008.01.005
- 高慧, 肖子牛, 赵亮. 2019. 21 世纪初澜沧江流域夏季降水的突变及相应的大气环流异常特征 [J]. *气候与环境研究*, 24(4): 513–524. Gao Hui, Xiao Ziniu, Zhao Liang. 2019. A study on the abrupt change of summer rainfall over Lancang River Basin and the associated atmospheric circulation in the early 21st century [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 24(4): 513–524. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18159
- 高弋斌, 路春燕, 钟连秀, 等. 2019. 1951—2016 年中国沿海地区气温与降水量的时空特征 [J]. *森林与环境学报*, 39(5): 530–539. Gao Yibin, Lu Chunyan, Zhong Lianxiu, et al. 2019. Temporal and spatial characteristics of temperature and precipitation in China's coastal areas from 1951 to 2016 [J]. *Journal of Forest and Environment (in Chinese)*, 39(5): 530–539. doi:10.13324/j.cnki.jfcf.2019.05.012
- 顾金普, 王双银, 龚家国, 等. 2017. 黑龙江省降水及旱涝时空演变特征 [J]. *水电能源科学*, 35(2): 17–20, 6. Gu Jinpu, Wang Shuangyin, Gong Jianguo, et al. 2017. Spatiotemporal evolution study of drought and flood in Heilongjiang Province [J]. *Water Resources and Power (in Chinese)*, 35(2): 17–20, 6.
- 桂翰林, 张秀红, 王春华, 等. 2009. 50 年来漠河县气候变化趋势分析 [J]. *现代化农业*, (6): 24–26. Gui Hanlin, Zhang Xiuhong, Wang Chunhua, et al. 2009. Analysis on climatic variation trend in Mohe County, Heilongjiang Province in last 50 years [J]. *Modernizing Agriculture (in Chinese)*, (6): 24–26. doi:10.3969/j.issn.1001-0254.2009.06.041
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 83, 145.
- 吉奇, 宋冀凤, 刘辉. 2006. 近 50 年东北地区温度降水变化特征分析 [J]. *气象与环境学报*, 22(5): 1–5. Ji Qi, Song Jifeng, Liu Hui. 2006. Characteristics of temperature and precipitation in Northeast China from 1951 to 2000 [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 22(5): 1–5. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2006.05.001
- 李慧群, 付遵涛. 2012. 基于 EEMD 的中国地区 1956—2005 年日照变化的趋势分析 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 48(3): 393–398. Li Huiqun, Fu Zuntao. 2012. Sunshine duration's trend behavior based on EEMD over China in 1956–2005 [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 48(3): 393–398. doi:10.13209/j.0479-8023.2012.054
- 李珍, 姜逢清. 2007. 1961–2004 年新疆气候突变分析 [J]. *冰川冻土*, 29(3): 351–359. Li Zhen, Jiang Fengqing. 2007. A study of abrupt climate change in Xinjiang region during 1961–2004 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 29(3): 351–359. doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2007.03.003
- 刘濛濛, 隆永兰. 2019. 巴音布鲁克近 58a 气候变化特征分析 [J]. *干旱区地理*, 42(4): 715–723. Liu Mengmeng, Long Yonglan. 2019. Climatic variation characteristics in Bayinbuluk during the past 58 years [J]. *Arid Land Geography (in Chinese)*, 42(4): 715–723.
- Liu G, Feng G L, Qin Y L, et al. 2015. Activity of cold vortex in

- Northeastern China and its connection with the characteristics of precipitation and circulation during 1960–2012 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 25(12): 1423–1438. doi:10.1007/s11442-015-1243-2
- 刘晓琼, 吴泽洲, 刘彦随, 等. 2019. 1960–2015 年青海三江源地区降水时空特征 [J]. *地理学报*, 74(9): 1803–1820. Liu Xiaoqiong, Wu Zezhou, Liu Yansui, et al. 2019. Spatial-temporal characteristics of precipitation from 1960 to 2015 in the Three Rivers' Headstream Region, Qinghai, China [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 74(9): 1803–1820. doi:10.11821/dlxb201909008
- 罗那那, 巴特尔·巴克, 吴燕锋. 2017. 基于集合经验模态分解北疆降水多尺度变化特征 [J]. *水土保持研究*, 24(4): 362–367. Luo Nana, Bake B, Wu Yanfeng. 2017. Precipitation multi-scale characteristics by Ensemble Empirical Mode Decomposition in Northern Xinjiang [J]. *Research of Soil and Water Conservation (in Chinese)*, 24(4): 362–367. doi:10.13869/j.cnki.rswc.2017.04.057
- 马冲亚, 王海霞, 付长超. 2009. 东北地区 50 年气温序列特征及趋势研究 [J]. *长春师范学院学报 (自然科学版)*, 28(6): 55–59. Ma Chongya, Wang Haixia, Fu Changchao. 2009. Analysis of the temperature time series variation and trend in Northeast China during the last 50 years [J]. *Journal of Changchun Normal University (Natural Science) (in Chinese)*, 28(6): 55–59. doi:10.3969/j.issn.1008-178X-B.2009.06.016
- 孙倩倩, 刘晶淼. 2014. 基于聚类分析的中国东北地区气温和降水时空变化特征 [J]. *气象与环境学报*, 30(3): 59–65. Sun Qianqian, Liu Jingmiao. 2014. Temporal-spatial change of temperature and precipitation based on CAST in Northeast China [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 30(3): 59–65. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2014.03.009
- Sun X B, Ren G Y, Ren Y Y, et al. 2018. A remarkable climate warming hiatus over Northeast China since 1998 [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 133(1–2): 579–594. doi:10.1007/s00704-017-2205-7
- 田立鑫, 韩美, 徐泽华, 等. 2019. 近 50 年淮河流域气温时空变化及其与 PDO 的关系 [J]. *水土保持研究*, 26(6): 240–248. Tian Lixin, Han Mei, Xu Zehua, et al. 2019. Temporal and spatial change of temperature in the Huaihe River Basin during the past 50 years and its relationship with PDO [J]. *Research of Soil and Water Conservation (in Chinese)*, 26(6): 240–248. doi:10.13869/j.cnki.rswc.20190917.001
- 王春红, 张讲社, 延晓冬, 等. 2009. 1961~2004 年漠河年均温与持续极端气温频数的变化分析 [J]. *气候与环境研究*, 14(5): 546–552. Wang Chunhong, Zhang Jiangshe, Yan Xiaodong, et al. 2009. Variations of annual mean temperature and durative extreme temperature frequency at Mohe during 1961–2014 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 14(5): 546–552. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.05.10
- 汪飞, 洪林, 吐尼亚孜·亚森, 等. 2020. 松花江流域气温时空变化规律 [J]. *水土保持研究*, 27(1): 347–352. Wang Fei, Hong Lin, Yassen T, et al. 2020. Spatiotemporal variations of air temperature in Songhua River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation (in Chinese)*, 27(1): 347–352. doi:10.13869/j.cnki.rswc.2020.01.048
- 王岱, 游庆龙, 江志红, 等. 2016. 中国极端气温季节变化对全球变暖减缓的响应分析 [J]. *冰川冻土*, 38(1): 36–46. Wang Dai, You Qinglong, Jiang Zhihong, et al. 2016. Response of seasonal extreme temperatures in China to the global warming slow down [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 38(1): 36–46. doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2016.0005
- Wu Z H, Huang N E. 2009. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 1(1): 1–41. doi:10.1142/S1793536909000047
- Xia J J, Yan Z W, Wu P L. 2013. Multidecadal variability in local growing season during 1901–2009 [J]. *Climate Dyn.*, 41(2): 295–305. doi:10.1007/s00382-012-1438-5
- 徐丽娇, 胡泽勇, 赵亚楠, 等. 2019. 1961–2010 年青藏高原气候变化特征分析 [J]. *高原气象*, 38(5): 911–919. Xu Lijiao, Hu Zeyong, Zhao Yanan, et al. 2019. Climate change characteristics in Qinghai-Tibetan Plateau during 1961–2010 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 38(5): 911–919. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00137
- 严晓瑜, 赵春雨, 王颖, 等. 2012. 近 50 年东北地区极端温度变化趋势 [J]. *干旱区资源与环境*, 26(1): 81–87. Yan Xiaoyu, Zhao Chunyu, Wang Ying, et al. 2012. Change trend of extreme temperature in Northeast China for the past 50 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese)*, 26(1): 81–87. doi:10.13448/j.cnki.jalre.2012.01.028
- 尹宪志, 张强, 徐启运, 等. 2009. 近 50 年来祁连山区气候变化特征研究 [J]. *高原气象*, 28(1): 85–90. Yin Xianzhi, Zhang Qiang, Xu Qiyun, et al. 2009. Characteristics of climate change in Qilian Mountains region in recent 50 years [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28(1): 85–90.
- 于泽兴, 胡国华, 陈肖, 等. 2017. 近 45 年来浏阳河流域极端降水变化 [J]. *水土保持研究*, 24(5): 139–143. Yu Zexing, Hu Guohua, Chen Xiao, et al. 2017. Change in extreme precipitation in Liuyang River Basin during the past 45 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation (in Chinese)*, 24(5): 139–143.
- Zhang W, Pan X. 2016. Study on the demand of climate finance for developing countries based on submitted INDC [J]. *Advances in Climate Change Research*, 7(1–2): 99–104. doi:10.1016/j.accr.2016.05.002
- 张可扬, 李天权, 曲延浩, 等. 2018. 大兴安岭地区降水量和气温变化趋势分析 [J]. *森林工程*, 34(5): 8–14. Zhang Keyang, Li Tianquan, Qu Yanhao, et al. 2018. Analysis of precipitation and temperature change in the Daxing'anling area [J]. *Forest Engineering (in Chinese)*, 34(5): 8–14. doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2018.05.002
- 赵春雨, 任国玉, 张运福, 等. 2009. 近 50 年东北地区的气候变化事实检测分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 23(7): 25–30. Zhao Chunyu, Ren Guoyu, Zhang Yunfu, et al. 2009. Climate change of the Northeast China over the past 50 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese)*, 23(7): 25–30.
- 周秀杰, 王凤玲, 吴玉影, 等. 2013. 近 60 年来黑龙江省与东北及全国气温变化特点分析 [J]. *自然灾害学报*, 22(2): 124–129. Zhou Xiujie, Wang Fengling, Wu Yuying, et al. 2013. Analysis of temperature change characteristics of Heilongjiang Province, Northeast China and whole country in recent 60 years [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 22(2): 124–129. doi:10.13577/

- j.jnd.2013.0217
- Zhou Z Q, Shi H Y, Fu Q, et al. 2020. Is the cold region in Northeast China still getting warmer under climate change impact? [J]. [Atmospheric Research](#), 237: 104864. doi:10.1016/j.atmosres.2020.104864
- 朱红蕊, 刘赫男. 2011. 黑龙江省 1961–2009 年极端气温事件变化特征分析 [J]. [气候变化研究进展](#), 7(2): 110–115. Zhu Hongrui, Liu Henan. 2011. Characteristics of extreme temperature events during 1961–2009 in Heilongjiang Province [J]. [Advances in Climate Change Research](#), 7(2): 110–115. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2011.02.006