

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.12.013

塞罕坝森林生态系统对区域温度降水变化的影响

邢博^{1,2}, 王英男³, 殷志强^{1,2*}, 邵海^{1,2}, 和泽康^{1,2}XING Bo^{1,2}, WANG Yingnan³, YIN Zhiqiang^{1,2*}, SHAO Hai^{1,2}, HE Zekang^{1,2}

1. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055;

2. 中国地质环境监测院, 北京 100081;

3. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035

1. Command Center of Comprehensive Survey for Natural Resources, China Geological Survey, Beijing 100055, China;

2. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China;

3. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China

摘要:森林是地-气之间物质运移和能量传递的高效接口,能够影响局地的气候特性。运用 MK 趋势检验和突变点识别、小波分析方法,选取塞罕坝地区为研究对象,以围场县和多伦县为参照对象,获取 3 个气象站的温度和降水资料,分析了各站 1961—2020 年的年降水、月降水、年均温、年最高温、年最低温、月均温的演变规律,对比得到塞罕坝森林对局地气候特性的影响。结果表明,林地对温度的影响表现在:年际尺度上,林地能够降低局地年均温、最高温、最低温,森林虽然改变不了局地升温的变化趋势,但能推迟升温的起始时间,并加强年均温的短周期变化;季节和月尺度上,林地能够维持春末夏初温度稳定、长时间尺度没有升降趋势、缩小年际间 7 月平均温的差异,却拉大冬夏季的温差,在冬季林地更易于出现低温。林地对降水的影响表现在:年际尺度上,林地能够减缓降水量的年际间波动,同时使局地降水增加更快;林地的存在打破了降水的周期性,使降水表现出非周期性变化;季节和月尺度上,林地减小了年内降水的集中程度,同时减缓了 6—7 月降水的变化趋势。

关键词:塞罕坝;森林生态系统;降水;温度;MK 趋势检验;小波分析;地质调查工程

中图分类号:P5;X141 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)12-2174-11

Xing B, Wang Y N, Yin Z Q, Shao H, He Z K. Influence of forest ecosystem on regional temperature and precipitation variation in Saihanba region. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(12): 2174–2184

Abstract: Forest is the highly-efficient interface between earth and atmosphere for substance migration and energy transfer, which can influence local climate characteristics. In this study, Mann-Kendall trend test and break points recognition, wavelet analysis were applied to analyze temperature and precipitation data over 60 years from 1961—2020 to characterize temperatures and precipitations in Saihanba on annual and monthly scales through contrasting those in Weichang and Duolun. It was found that at the interannual scale, forest decreased local annual average temperature, maximum temperature and minimum temperature. Although it could not change the rising trends of temperature, it delayed the beginning time of warming, and enhanced average temperature variation of interannual in short period. At the seasonal and monthly scale, forest maintained stable temperature in late spring and early summer and reduced average temperature variation of interannual in July, meanwhile widened temperature differences between summer and winter and more experienced low temperature in winter. At the interannual scale, forest decreased interannual variation of annual precipitation, speeded up precipitation rising and broke the cycle period of interannual. At the seasonal and monthly scale, forest dispersed precipitation to different

收稿日期:2022-05-28;修订日期:2022-08-24

资助项目:国家自然科学基金联合基金项目《北方关键生态功能区地表基岩异质性对植被生态约束机理研究——以张承地区为例》(批准号:U2344227)和中国地质调查局项目《承德资源环境承载力综合地质调查与评价》(编号:DD20230489)

作者简介:邢博(1987—),女,高级工程师,从事自然资源综合评价与水平衡研究。E-mail:xbxf@163.com

*通信作者:殷志强(1980—),男,博士,正高级工程师,从事第四纪环境演变与地表基岩研究。E-mail:yinzhiqiang@mail.cgs.gov.cn

seasons, and slowed down the rate of precipitation variation in June and July.

Key words: Saihanba; forest ecosystem, precipitation; temperature; MK trend test; wavelet transform; geological survey engineering

在全球变暖背景下,中国是全球气候变化的敏感区和影响显著区。1951—2020 年,中国地表年均温和年累计降水量分别以 $0.26^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $5.1\text{ mm}/10\text{a}$ 的速率增加,升温速率明显高于同期全球平均水平,降水变化区域间差异明显(中国气候变化蓝皮书,2021)。森林作为地—气接口的高效系统,其通过光合作用将 CO_2 转化为净初级生产力的过程受气候变化影响(Gwate et al., 2022),同时区域森林植被覆盖率也制约局地气候(王日明等,2020)。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告(AR6)指出,大规模的森林砍伐可能造成被砍伐区蒸发和降水的减少(姜大膀等,2021),相反退耕还林和人工造林也可能导致林区温度和降水在不同时间尺度上的变化。

森林对气温的影响主要表现为冠层遮挡日照抑制日间温度升高,减缓散热抑制夜间温度降低。前人关于森林对降水的影响认识不一,争论的焦点是森林究竟能否提供更多降水(闵庆文等,2001)。“增雨论”认为,林木蒸腾增加空气湿度为大气垂直降水提供水汽条件;“减雨论”认为,林区日间地面温度升高受到抑制,对流削弱减少大气降水(田磊等,2012)。水汽和能量是产生降水的必备条件,蒸腾增加水汽和冠层削弱对流是相伴而生的 2 个过程,只是在不同地区二者的贡献度有所区别,导致降水的增减效果不同,即森林对降水的影响存在地区差异。全球/区域气候模式可用于植被变化对气候的影响研究,如范广州等(1999)模拟华北发生“落叶林—草原—部分沙漠—全部沙漠”演替时发现,华北地区夏季降水量略减少但降水总量变化不大,局地降水增减不同且变化量可观。姜大膀等(2003)发现,沙区绿化后,年地表温度沿海略降低、其余地区升高,夏季降雨量北方和西北增加,长江流域及其以南地区减少。丁一汇等(2005)发现,西北地区绿化利于黄河流域降水增加,而长江流域和江南地区降水不同程度减少,植树造林使当地及周围地区冬偏暖、夏偏凉。陈军明等(2010)认为,中国近 30 a 来西部植被变化导致北方夏季降水减少。况雪源等(2021)发现,植被差异改变降水导致季风雨带出现径向位移。然而,大尺度气候模式分辨率

较低,对中小尺度强迫引起的区域或局地气候变化的细节描述较粗糙,植被和气候的交互物理机制模拟不够深入(陈军明等,2010)。所以,也有学者根据气象站监测数据与植被参数如归一化植被指数(NDVI)的回归关系,分析植被变化对气候的影响。如张井勇等(2003)发现,植被覆盖在年际尺度上对后期降水有一定影响,并且存在明显的区域差异,温度的滞后响应更弱。樊宝敏等(2010)发现,森林厚度每增加/减少 1 mm ,降水增加/减少 37 mm 。已有研究多集中在年尺度上林地变化对气候变化的影响,然而森林对月尺度温度和降水的年际间波动和年内变化影响也应该成为关注的重点,如林地是否影响 7—8 月的降水,改变极端降水发生的可能性,能否改变 1—2 月或 7—8 月的温度,从而影响土壤微生物活性等。

塞罕坝地区位于内蒙古高原与燕山山地农牧交错带,季风与非季风交汇区,因历史时期多次气候环境反转形成林木稀疏、风沙肆虐的荒漠沙地,是京津冀最近的沙源区和生态环境脆弱敏感区(邵海等,2022;邢博等,2022)。1962 年,组建了塞罕坝大型机械林场,采取措施阻止沙源南下,经过 60 a 的造林,塞罕坝林地面积达到 763.37 km^2 ,森林覆盖率达到 82%(殷志强等,2022)。为了更透彻地了解坝上人工林对局地气候特性的影响,本文以塞罕坝气候为研究对象,以围场和多伦气候为对照,采用 MK 检验和小波分析研究各站 1961—2020 年的年降水、月降水、年均温、年最高温、年最低温、月均温的演变规律,定量分析塞罕坝森林对局地气候特性的影响,为林业部门的科学绿化和生态环境部门的生态恢复提供依据。

1 研究区域

塞罕坝地区位于内蒙古高原东南缘,属于半干旱地区(卞娟娟等,2013)。塞罕坝机械林场始建于 1962 年,此时森林覆盖率仅为 20.95%,至 1982 年森林覆盖率大幅提升到 59.53%,创全国造林保存率之最(孙敏茹等,2013);20 世纪 80—90 年代,森林覆盖率仍保持较快的增长趋势,1991 年和 2000 年分别为 67.05% 和 78.07%;之后森林覆盖率增长变缓,

2010 年和 2020 年分别为 80% 和 82%。塞罕坝气象站建于机械林场内;围场气象站位于塞罕坝站东南 55 km,周围是耕地、草地、林地复合景观格局;多伦气象站位于塞罕坝西南 78 km,周围是草地、沙地、耕地复合景观。本次选取塞罕坝气象站作为森林对局地气候特性影响的研究站,围场站、多伦站作为气候特征的对比站,这 3 个气象站地理位置相近,属于相同气候带,海拔高度相差不大,尤其是塞罕坝站和多伦站的海拔高度仅相差 260.6 m,3 个气象站最大的差异在于周围的土地覆被,所以可用于气候迥异的对比分析。塞罕坝、围场、多伦站 1961—2020 年的平均降水分别为 459.9 mm、443.5 mm、367.0 mm,塞罕坝超过 80% 的降水集中在 5—9 月,围场和多伦超过 80% 的降水集中在 6—9 月;3 个气象站 1961—2020 年的平均气温为 -1.0°C 、 5.2°C 、 2.5°C 。

2 研究方法

塞罕坝站 1961—2020 年温度和降水月值气象资料来源于塞罕坝机械林场,但其中 1962—1964 年的某些月份缺测严重(任艳林,2012),不参与分析,未缺测部分已做质量控制,直接可用。围场和多伦站 1961—2020 年温度和降水日值气象资料来源于国家气象科学数据中心(<http://www.data.cma.cn>),按照《地面气象观测资料质量控制 QX/T118—2010》标准对所有数据进行质量控制,然后将日值处理成月值和年值。从统计的角度,序列长度为 60 a 的气候资料用于分析降水和温度特性较可靠(左斌斌等,2019)。

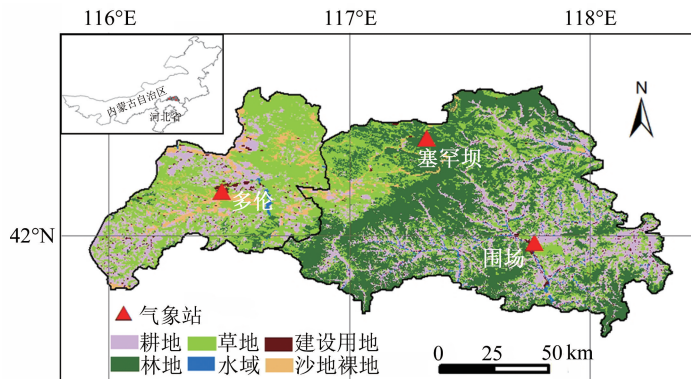


图 1 研究区土地覆被和气象站位置

Fig. 1 Land cover and location of meteorological stations in study area

Mann-Kendal(MK)统计检验方法是基于秩的非参数检验,检验变量独立而不需要遵循某种特定的分布(Mann,1945;Kendall,1975),适用于如气温、降水、径流等水文气象资料的长时间序列变化趋势分析(徐宗学等,2009),同时对均值突变检验结果相对准确(符淙斌等,1992),故选其作为研究区降水和温度的变化趋势和突变点分析方法。Sen(1968)提出的 Sen's 坡度是长期变化趋势的无偏估计,能够估算趋势变化的快慢,是对 MK 检验的补充。MK 趋势检验算法参见 Sang et al.(2014)和公式(1)~(4),突变检验算法参见王安琪等(2017)和公式(5)~(8),Sen's 坡度检验算法参见 Gocic et al.(2013)和公式(9)、(10)。

时间序列 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是 n 个独立随机变量同分布样本。

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (1)$$

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1, & x_i - x_j > 0 \\ 0, & x_i - x_j = 0 \\ -1, & x_i - x_j < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}} \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma_s}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma_s}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $j < i \leq n$; S 基本服从正态分布; σ_s 为标准差; $Z > 0$ 时为增加趋势, $Z < 0$ 时为减少趋势。

m_i 表示第 i 个样本 $x_i > x_j (1 \leq j \leq i)$ 的累计数,定义统计量 c_k :

$$c_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (5)$$

$$E(c_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (6)$$

$$\sigma(c_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (7)$$

$$UF_k = \frac{c_k - E(c_k)}{\sqrt{\sigma(c_k)}} \quad (8)$$

式中, $E(c_k)$ 、 $\sigma(c_k)$ 为 c_k 的均值和方差, UF_k 为 c_k 的标准化。按照逆序时间序列 $(x_n, x_{n-1}, \dots, x_1)$ 重复公式(5)~(8)得到 UB_k 。

绘制 UF 和 UB 两条曲线,二者在置信区间内出现的交点即为突变点。

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k}, j, k = 1, \dots, N \quad (9)$$

式中, x_j, x_k 为时间序列为 j, k 时的数据值 ($j > k$)。若每个时间序列中观测值唯一, $N = \frac{n(n-1)}{2}$; 若每个时间序列中有多个观测值, $N < \frac{n(n-1)}{2}$, n 为时间序列中观测值的数量。将 N 个数据值 Q_i 由小到大排序, Sen's 坡度 Q_{med} 为

$$C = \begin{cases} Q_{\frac{N+1}{2}}, N \text{ 为奇数} \\ \frac{Q_{\frac{N}{2}} + Q_{\frac{N+2}{2}}}{2}, N \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (10)$$

式中, Q_{med} 为正表示增加趋势, 为负表示减少趋势, 大小表示变化程度。

气象要素有复杂的周期变换特征且可能同一时段内包含多种时间尺度的变化周期(韩熠哲等, 2017), 小波分析起初用来做地震波信号的周期分析(Morlet, 1983; Grossmann et al., 1984), 近几十年来被广泛用于不同尺度(周期)的气象要素随时间长期演变周期研究(Yi et al., 2012)。本文采用 Morlet 小波进行连续小波变换(CWT), 因为其具有时频同步性, 并且已多次用于水文气象研究, 算法参见 Hermida et al. (2015) 和 Liu et al. (2010) 及公式(11)、(12)。

时间序列 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的 CWT 被定义为:

$$W_n^x(s) = \sqrt{\frac{\delta t}{s}} \sum_{n=1}^N x_n \psi_0 \left[(n' - n) \frac{\delta t}{s} \right] \quad (11)$$

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i w_0 \eta} e^{-\frac{1}{2} \eta^2} \quad (12)$$

式中, s 为尺度因子; w_0 为无量纲频率; η 为无量纲时间。小波分析借助 matlab 编程实现。

通过上述方法可对降水和温度的整体变化趋势、突变特征及时间序列的变化周期进行分析, 再对比 3 个气象站的各要素特征值可辨识森林对局地气候特性的影响。

3 结果与分析

3.1 温度

3.1.1 年际变化特征

计算得到 3 个气象站 1961—2020 年年均温、年

最高温、年最低温时间序列(图 2)。对于年均温和最低温, 均表现出围场最高、多伦居中、塞罕坝最低的特征; 对于最高温, 围场和多伦相近, 二者高于塞罕坝。这表明, 林地的存在使局地年均温、最高温、最低温都降低。

3 个气象站的年均温整体都呈升高的趋势, 过程中均可分为先波动或降低、后升高 2 个阶段(图 3)。塞罕坝平均温整体以 $0.19^\circ\text{C}/10\text{a}$ ($p < 0.01$) 的速率升高, 1997 年是突变点, 从升降波动变为升高, 尤其是 2015 年开始显著升高。围场平均温度整体以 $0.11^\circ\text{C}/10\text{a}$ ($p < 0.05$) 的速率升高, 1979 年是突

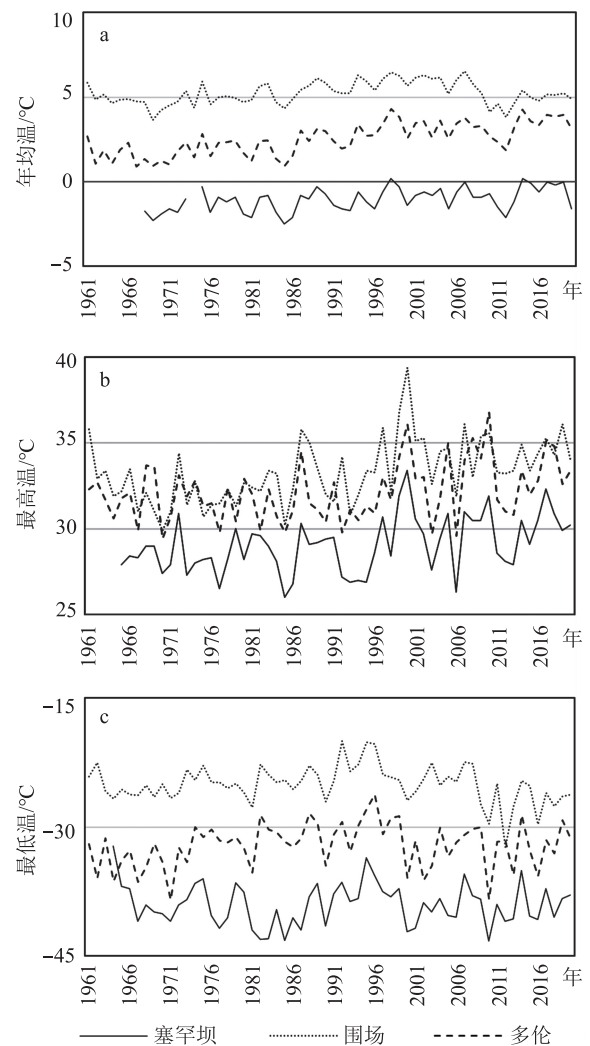


图 2 1961—2020 年年均温(a)、最高温(b)和最低温(c)变化趋势

Fig. 2 Trends of annual average temperature(a), maximum temperature(b) and minimum temperature(c) from 1961 to 2020

变点,从降低变为升高,尤其是 1993 年后显著升高。多伦平均温度整体以 $0.41^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($p<0.01$) 的速率升高,1975 年以前呈降低趋势,1975 年后升高,1993 年为突变点,此后显著升高。塞罕坝年均温绝对升高速率居中(多伦>塞罕坝>围场),但相对升高速率(绝对升高速率与多年平均年均温的比值)最高(塞罕坝 $18.5\%/10\text{a}$ >多伦 $16.4\%/10\text{a}$ >围场 $2.1\%/10\text{a}$),开始升高的年份比围场和多伦晚 18 a 和 22 a,显著升高的年份晚 22 a,森林虽然改变不了局地升温的变化趋势,但能推迟升温的起始时间。

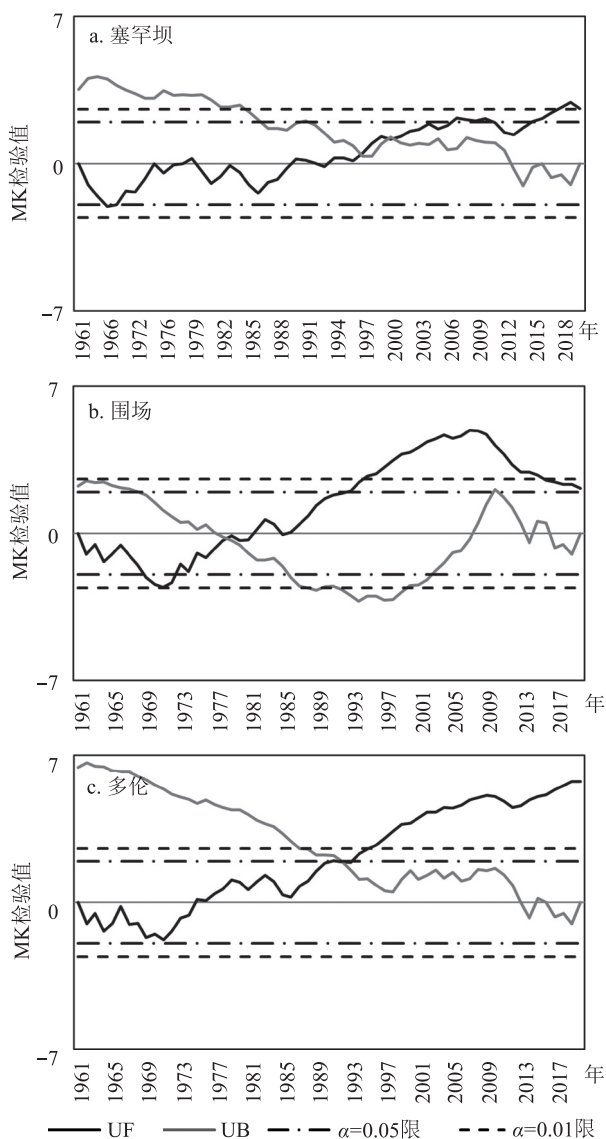


图3 1961—2020 年年均温 MK 趋势和突变点识别

Fig. 3 MK trends and break points recognition of annual average temperature from 1961 to 2020

对于年最高温,3 个气象站整体都呈升高趋势,但升高过程存在差异(图 4)。塞罕坝整体以 $0.38^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($p<0.01$) 的速率升高,1999 年前升降波动,1999 年后升高,尤其是 2017 年开始显著升高。围场整体以 $0.53^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($p<0.01$) 的速率升高,1987 年前呈降低趋势,1987 年后升高,尤其是 1995 年后显著升高。多伦整体以 $0.30^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($p<0.05$) 的速率升高,1975 年以前有升降波动,1975—1999 年降低,1999—2007 年再次升降波动,2007 年后升高。年最高温升高的速率围场>塞罕坝>多伦,与 3 个气象站年均温升高速率快慢相反。

对于年最低温,塞罕坝和多伦整体呈升高趋势,而围场呈降低趋势,过程不相同(图 5)。塞罕坝以 $0.56^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率升高,整个过程为升—降—

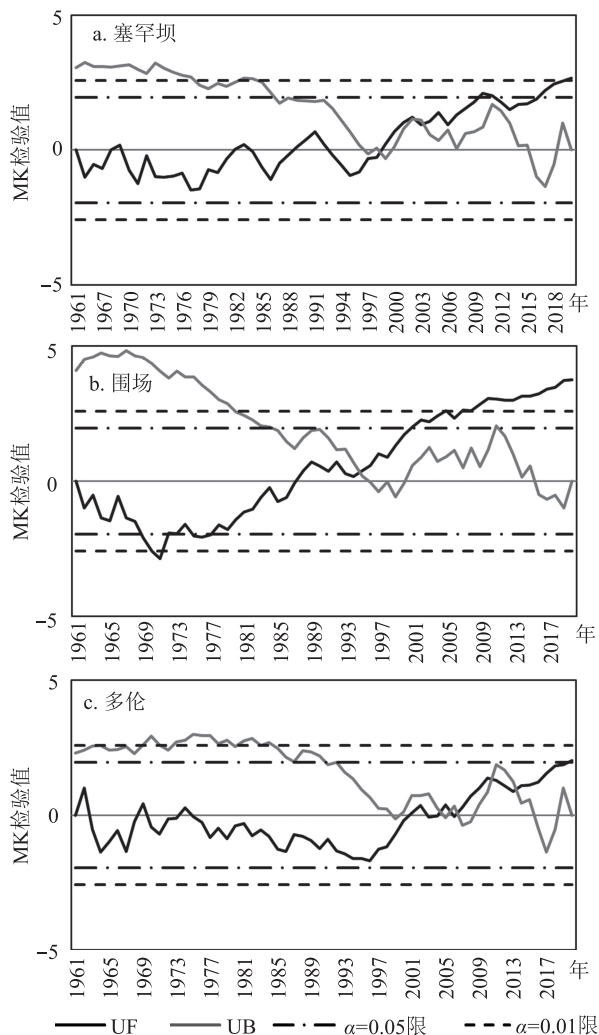


图4 1961—2020 年最高温 MK 趋势和突变点识别

Fig. 4 MK trends and break points recognition of annual maximum temperature from 1961 to 2020

升—降—升—稳趋势,并存在多个突变点,主要降低时段为 1981—1994 年,主要升高时段在 1994—2013 年。围场以 $0.95^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率降低,整个过程为降—升—降趋势,主要下降期在 1974 年以前和 2017 年以后,1975—2016 年间升高,甚至在 1995—2010 年期间显著升高了 5 a。多伦以 $0.31^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($p<0.05$) 的速率升高,1974 年以前下降,1974 年后升高,尤其是 1983—2015 年期间显著升高。主要升高期的起始年份塞罕坝晚于围场和多伦 20 a。

3 个气象站 60 a 的年均温小波功率见图 6。塞罕坝的小波功率谱在 4 a 左右出现高值,尤其是 1981 年、1998 年、2013 年前后 ($p<0.05$);此外从 20

世纪 90 年代开始存在 10 a 左右的高值,建站开始到 20 世纪 80 年代初存在 15 a 左右的高值。围场在 1973—1977 年和 80 年代分别存在 2.2 a 和 4 a 左右的较高值 ($p<0.05$);多伦在 1973 年和 2003 年存在 2~3 a 的较低值,1982 年和 1996 年存在 4 a 左右的较低值。对比而言,森林使得年均温的短周期变化更显著。

3.1.2 月度变化特征

绘制月平均温箱线图(图 7)可以看出,各站最高平均温均出现在 7 月且量值接近,但 25% 与 75% 分位的温度差为塞罕坝 (1.3°C) < 围场 (1.5°C) < 多伦 (1.6°C),最低平均温均出现在 1 月且量值相差较大。各站 7 月和 1 月平均温的差值塞罕坝 (38.1°C) > 多伦 (36.3°C) > 围场 (33.7°C)。说明在夏季林地缩小了年际间 7 月平均温的差异,但拉大了各年冬夏季的温差,在冬季林地更易于出现低温。

对于各月月均温,多伦呈升高趋势,且 Sen's 的坡度是 3 个气象站中最大的。围场 1—9 月呈升高趋势,10—12 月呈降低趋势。塞罕坝 1—4 月和

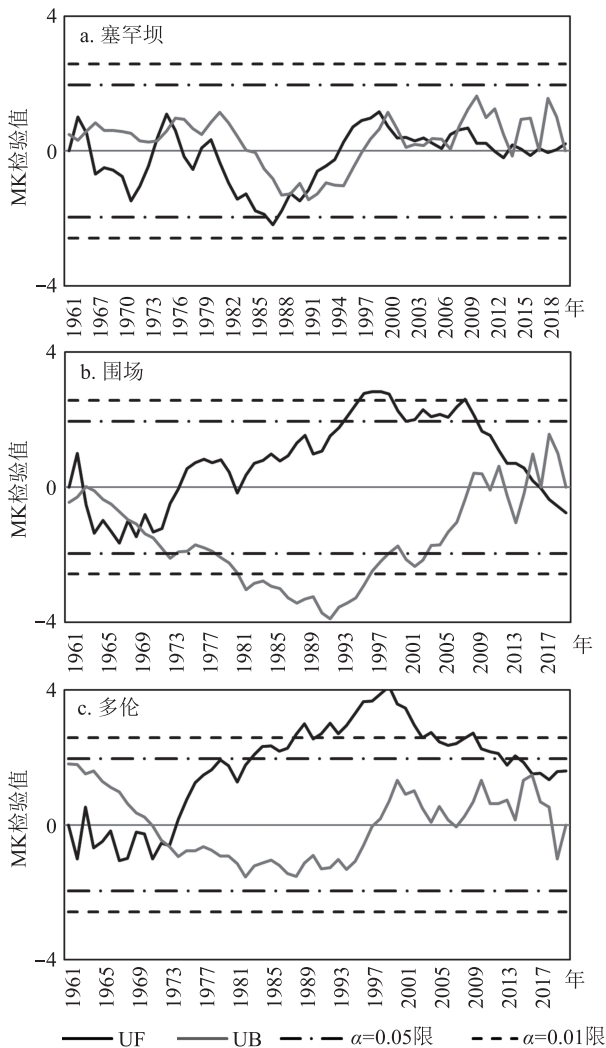


图 5 1961—2020 年最低温 MK 趋势和突变点识别

Fig. 5 MK trends and break points recognition of annual minimum temperature from 1961 to 2020

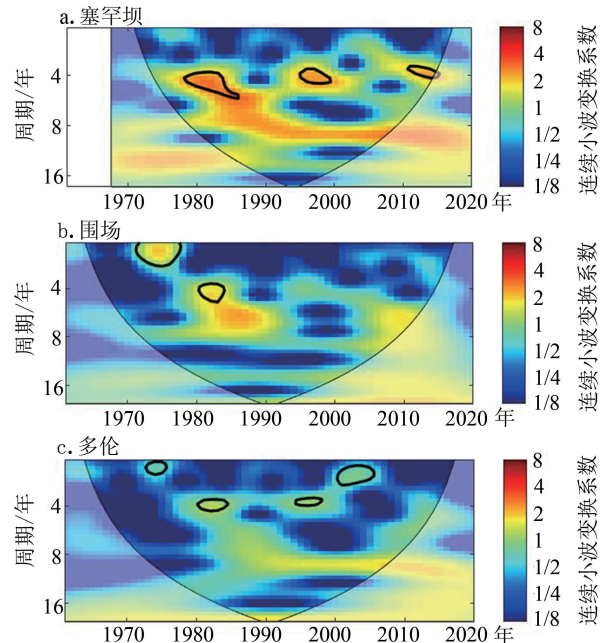


图 6 1961—2020 年年均温小波功率谱 (右侧标度 CWT (连续小波变换系数) 值越大表明周期越明显,通过显著性检验的部分在图中用黑实线圈出。黄色、橙色、绿色代表正相关,蓝色代表负相关)

Fig. 6 Wavelet power spectrum of annual average temperature from 1961 to 2020

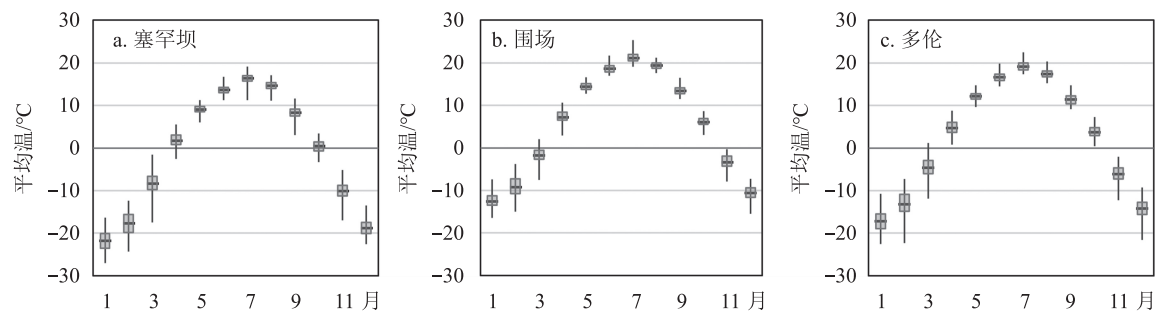


图7 月平均温 25%~75%箱线图

Fig. 7 25%~75% boxplot graph of month average temperature

7—9 月呈升高趋势,10—12 月呈降低趋势,5—6 月无变化趋势,表明在春末夏初林地能够维持月均温稳定,没有升高和降低的趋势。1—4 月,3 个气象站都呈升高趋势,其中 2 月和 3 月是升高较快的 2 个月(表 1)。

3.2 降水

3.2.1 年际变化特征

计算得到 3 个气象站 1961—2020 年累计降水时间序列,塞罕坝和围场年降水量较高且年际间变化幅度较大(图 8)。塞罕坝 3 个极大值出现在 1973 年(603.1 mm)、1991 年(636.0 mm)和 2018 年(651.1 mm),2 个极小值出现在 1971 年(258.8 mm)和 1989 年

(280.2 mm);围场 1974 年降水量最大(648.0 mm),1984 年最小(249.0 mm),60 a 间出现多个极大值和极小值;多伦 1983 年降水量最大(509.7 mm),1972 年最小(227.4 mm),同样 60 a 间有多个极大值和极小值。林地能够在一定程度上减缓降水量的年际间波动。

通过 MK 趋势检验和突变点检验,进一步确定各站的年降水变化趋势(图 9)。3 个气象站整体呈增加趋势。塞罕坝年降水增加最快(Sen's 坡度为 1.31($p<0.05$)),20 世纪 60—80 年代前期增减波动,80 年代中期为突变点,此后持续增加,尤其是 90 年代显著增加。围场年降水增加速率居中(Sen's 坡度为 1.17, $p<0.05$),在各年代有多个突变点,这与前

表 1 1961—2020 年月均温 MK 趋势检验和 Sen's 坡度

Table 1 MK trends and Sen's slopes of month average temperature from 1961 to 2020

月份	塞罕坝			围场			多伦		
	Sen's	Z	趋势	Sen's	Z	趋势	Sen's	Z	趋势
1	0.009	0.38	↑	0.016	1.22	↑	0.042	2.21 *	↑
2	0.038	1.38	↑	0.036	1.80 *	↑	0.080	3.38 * *	↑
3	0.060	2.93 * *	↑	0.030	2.35 * *	↑	0.075	4.48 * *	↑
4	0.020	1.58	↑	0.019	1.63	↑	0.039	3.20 * *	↑
5	0.000	0.16		0.007	0.91	↑	0.029	3.54 * *	↑
6	0.000	0.16		0.005	0.70	↑	0.030	3.62 * *	↑
7	0.017	1.96 *	↑	0.009	1.22	↑	0.029	3.51 * *	↑
8	0.010	1.25	↑	0.010	1.27	↑	0.033	4.50 * *	↑
9	0.025	2.90 * *	↑	0.019	2.52 * *	↑	0.039	4.60 * *	↑
10	-0.002	-0.21	↓	-0.007	-0.89	↓	0.030	2.69 * *	↑
11	-0.006	-0.36	↓	-0.010	-0.78	↓	0.021	1.61	↑
12	-0.007	-0.36	↓	-0.010	-0.59	↓	0.020	1.19	↑

注: * 表示通过 95% 显著性检验, * * 表示通过 99% 显著性检验; ↑ 表示升高, ↓ 表示降低

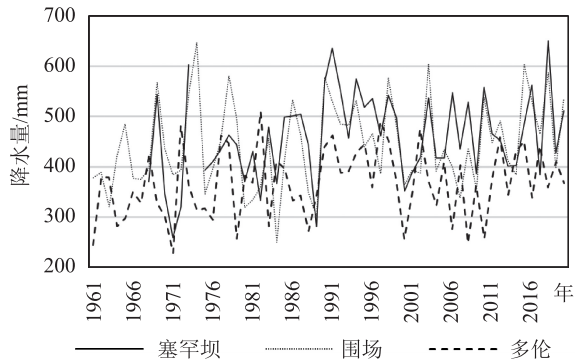


图 8 1961—2020 年年降水量变化趋势

Fig. 8 Trends of annual total precipitation from 1961 to 2020

述年际间波动较大一致。多伦年降水增加最慢 (Sen's 坡度为 0.97, $p < 0.05$), 20 世纪 60—70 年代增减波动, 1978 年为突变点, 此后持续增加, 尤其是 90 年代后期至 21 世纪初显著增加。从年降水量绝对增长速率看, 林地使局地降水增加最快; 但由于塞罕坝自身降水量较大, 所以从相对增加速率 (Sen's 坡度与多年平均降水量的比值) 看, 3 个气象站相当 (塞罕坝 0.28%/a, 围场 0.26%/a, 多伦 0.26%/a)。3 个气象站 60 a 的降水小波功率见图 10。在 20 世纪 90 年代之前, 3 个气象站都能找到 4 a 左右的功率高值 ($p < 0.05$), 塞罕坝在 1972 年和 1990 年前后出现, 围场在 60 年代中期—80 年代存在高值带, 多伦在 70 年代存在高值带。此外, 围场全时间序列和多伦 90 年代之后还存在 20 a 左右的高值带。对比而言, 森林的存在打破了降水的周期性, 尤其是长震荡周期, 使降水表现出非周期性。

3.2.2 月度变化特征

从月降水箱线图 (图 11) 可以看出, 3 个气象站的降水都集中在 6—9 月, 这 4 个月降水总和占全年的比例, 塞罕坝 (74.32%) 低于围场 (78.21%) 和多伦 (80.11%), 说明林地能够减小年内降水的集中程度。通过比较 3 个气象站, 塞罕坝和围场月降水均为 7 月波动最大 (233.8 mm 和 312.2 mm), 多伦 8 月降水波动最大 (225.2 mm)。

对比各月降水的变化趋势 (表 2), 3 个气象站在 4—6 月和 9—11 月呈增加趋势, 5、6 月增加最快; 塞罕坝和多伦在 7—8 月减少, 围场 7 月减少、8 月增加。塞罕坝 6 月降水增加和 7 月降水减少的速率均最低, 表明林地能够减缓 6—7 月降水的变化趋势。

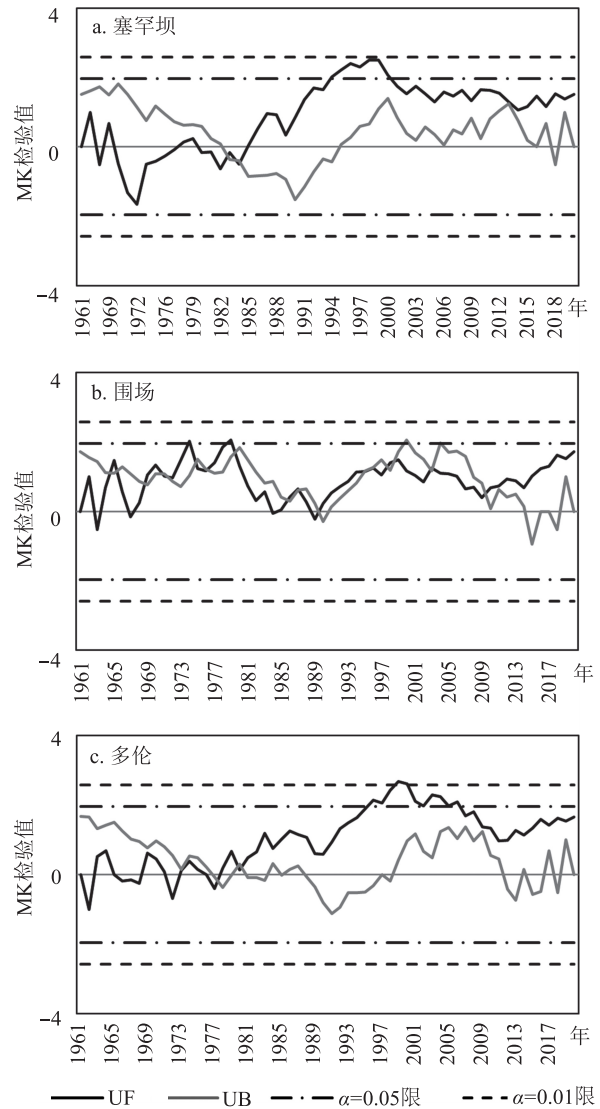


图 9 1961—2020 年年降水 MK 趋势和突变点识别

Fig. 9 MK trends and break points recognition of annual total precipitation from 1961 to 2020

4 讨论

除围场的年最低温以外, 塞罕坝、围场、多伦的年均温、最高温、最低温在过去的 60 a 间均呈升高趋势, 其中围场的年最低温也有 40 a 在升高, 只是在 2010 年以后才有了明显的降低趋势。对于年均温和最低温, 塞罕坝温度升高的起始年晚于其他 2 个站 20 a 左右, 表明机械林场的存在起到了推迟年均温和最低温升高的作用。塞罕坝年均温小波功率在 4 a 左右出现高值, 而围场和多伦存在周期变化, 但功率较低, 森林加强了年均温的短周期变化。

表 2 月降水 MK 趋势检验和 Sen's 坡度
Table 2 MK trends and Sen's slopes of month total precipitation

月份	塞罕坝			围场			多伦		
	Sen's	Z	趋势	Sen's	Z	趋势	Sen's	Z	趋势
1	0.00	0.11		0.00	-0.14		0.01	5.06 * *	
2	0.05	1.71 *		0.00	0.14		0.04	5.37 * *	
3	0.00	0.01		0.01	0.38		0.06	4.36 * *	
4	0.15	1.86 *	↑	0.09	0.95	↑	0.16	2.50 * *	↑
5	0.32	1.74 *	↑	0.33	1.79 *	↑	0.22	1.88 *	↑
6	0.40	1.63	↑	0.44	1.77 *	↑	0.43	2.09 *	↑
7	-0.26	-0.67	↓	-0.39	-0.98	↓	-0.40	-1.14	↓
8	-0.10	-0.36	↓	0.19	0.34	↑	-0.54	-1.89 *	↓
9	0.24	1.11	↑	0.09	0.42	↑	0.23	1.38	↑
10	0.14	1.41	↑	0.16	1.63	↑	0.20	2.92 * *	↑
11	0.10	2.01 *	↑	0.03	0.98	↑	0.10	4.86 * *	↑
12	0.04	1.63		0.00	0.58	↑	0.03	4.87 * *	

注：* 表示通过 95% 显著性检验，* * 表示通过 99% 显著性检验

3 个气象站的月平均温最高值出现在 7 月,最低值出现在 1 月。塞罕坝 7 月的 25% 和 75% 分位的平均温度差低于另外 2 个站,7 月和 1 月的差值高

于另外 2 个站。林地缩小了年际间 7 月平均温的差异,却拉大了冬夏季的温差,在冬季林地更易于出现低温。塞罕坝 5—6 月月均温没有升降趋势,林地能够维持春末夏初温度稳定。

林地环境下,除个别极大值、极小值外,年降水量年际间变化幅度较小,另外 2 个站年际间波动较大,出现多个极值。经查阅资料(刘琳等,2019),1972 年、1991 年、2018 年是 ENSO 暖事件年,1971 年、1988 年是 ENSO 冷事件年,这几年与塞罕坝站出现降水极大值和极小值的年份基本对应,说明林地环境下除受大气环流影响出现极大值、极小值外,林地能够减缓降水量的年际间波动,同时使局地降水增加更快。林地的存在打破了降水的周期性,尤其是长震荡周期,使降水表现出非周期性变化。

3 个气象站的降水都集中在 6—9 月,塞罕坝这几个月的降水在全年降水的占比最少,6 月降水增加的速率最低,7 月降水减少的速率最低。林地减小了年内降水的集中程度,减缓了 6—7 月降水的变化趋势。

5 结 论

本文在获取塞罕坝、围场和多伦 3 个气象站温度和降水资料的基础上,通过 MK 趋势检验和突变点识别、小波分析方法,分析各站 1961—2020 年的

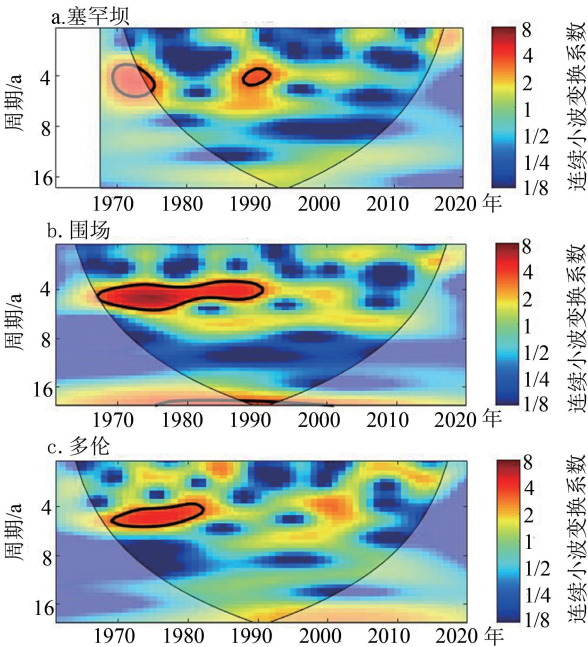


图 10 1961—2020 年年降水小波功率谱
(右侧标度 CWT(连续小波变换系数)值越大表明周期越明显,通过显著性检验的部分在图中用黑实线圈出。
黄色、橙色、绿色代表正相关,蓝色代表负相关)

Fig. 10 Wavelet power spectrum of annual total precipitation from 1961 to 2020

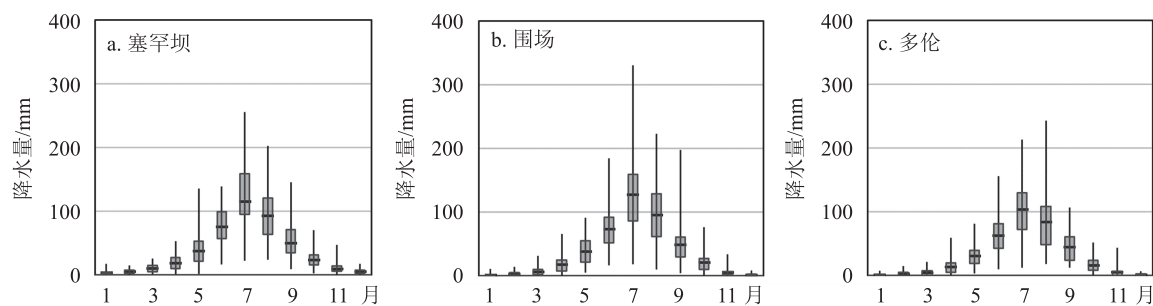


图 11 月降水量 25%~75% 箱线图

Fig. 11 25%~75% boxplot graph of month total precipitation

年降水、月降水、年均温、年最高温、年最低温、月均温的演变规律,对比得到塞罕坝森林对局地气候特性的影响,取得了以下主要认识。

(1) 林地的存在降低了局地年均温、最高温、最低温,起到推迟年均温和最低温升高的作用,能够加强年均温的短周期变化。

(2) 林地缩小了年际间高温月(7月)平均温的差异,维持春末夏初温度稳定,却拉大冬夏季的温差,在冬季林地更易于出现低温。

(3) 除受大气环流影响出现极大值、极小值外,林地能够减缓降水量的年际间波动,打破降水的周期性变化,使局地降水增加更快。

(4) 林地减小年内降水的集中程度,减缓了雨季(6—7月)降水的变化趋势。

参考文献

- Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 100: 172-182.
- Grossmann A, Morlet J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape[J]. *SIAM J. Math. Anal.*, 1984, 15 (4): 723-736.
- Gwate O, Ndou G. Exploring water use and production dynamics of an indigenous African dry forest in south-western Zimbabwe[J]. *Journal of Arid Environments*, 2022, 198: 104678.
- Kendall M. Rank Correlation Methods[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- Hermida L, López L, Merino A, et al. Hailfall in southwest France: Relationship with precipitation, trends and wavelet analysis[J]. *Atmospheric Research*, 2015, 156: 174-188.
- Liu J R, Fu G B, Song X F, et al. Stable isotopic compositions in Australian precipitation[J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, 115: D23307.
- Mann H. Non-parametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13: 245-259.
- Morlet J. Sampling theory and wave propagation[M]. NATO ASI Series, FI, Springer, 1983: 233-261.
- Sang Y F, Wang Z, Liu C. Comparison of the MK test and EMD method for trend identification in hydrological time series[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 510: 293-298.
- Sen P K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau[J]. *Publications of the American Statistical Association*, 1968, 63 (324): 1379-1389.
- Yi H, Shu H. The improvement of the Morlet wavelet for multi-period analysis of climate data[J]. *Compt. Rendus Geosci.*, 2012, 344 (10): 483-497.
- 卞娟娟, 郝志新, 郑景云, 等. 1951—2010 年中国主要气候区划界线的移动[J]. *地理研究*, 2013, 32(7): 1179-1187.
- 陈军明, 赵平, 郭晓寅. 中国西部植被覆盖变化对北方夏季气候影响的数值模拟[J]. *气象学报*, 2010, 68(2): 251-259.
- 丁一汇, 李巧萍, 董文杰. 植被变化对中国区域气候的数值模拟研究[J]. *气象学报*, 2005, 63(5): 613-621.
- 樊宝敏, 李智勇. 过去 4000 年中国降水与森林变化的数量关系[J]. *生态学报*, 2010, 30(20): 5666-5676.
- 范广州, 吕世华. 陆面植被类型对华北地区夏季降水影响的数值模拟研究[J]. *高原气象*, 1999, 18(4): 649-658.
- 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和监测方法[J]. *大气科学*, 1992, 16(4): 482-493.
- 韩熠哲, 马伟强, 王炳赟, 等. 青藏高原近 30 年降水变化特征分析[J]. *高原气象*, 2017, 36(6): 1477-1486.
- 姜大膀, 王娜. IPCC AR6 报告解读: 水循环变化[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17 (6): 699-704.
- 姜大膀, 王式功, 郎咸梅, 等. 沙区绿化对区域气候影响的数值模拟研究[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(1): 63-66.
- 况雪源, 韩跃超. 全新世背景下中国区域气候对指标变化响应的降尺度模拟研究[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(12): 1301-1312.
- 刘琳, 徐宗学, 杨晓静. 西南地区旱涝演变与 ENSO 事件的关系[J]. *资源科学*, 2019, 41(11): 2144-2153.
- 闵庆文, 袁嘉祖. 森林对于降水的可能影响: 几种分析方法所得结果的比较[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 467-473.
- 任艳林. 1965—2011 年河北塞罕坝地区降水量变化规律的小波分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(6): 918-914.
- 邵海, 殷志强, 王轶, 等. 河北坝上高原如意河流域风积沙厚度空间展

- 布预测方法[J].地质通报,2022,41(12): 2138-2145.
- 孙敏茹,郭玲玲,闵学武,等.塞罕坝机械林场气候因子变化与当地林业发展的关系[J].河北林业科技,2013,5: 69-71.
- 田磊,杨建玲,翟涛,等.森林对降水的影响概述[J].宁夏农林科技,2012,53(4): 19-22.
- 王安琪,高玉琴,蔡涛.大凌河流域朝阳地区 1955~2014 降水趋势变化及突变分析[J].水文,2017,37(5): 92-96.
- 王日明,吴天亮,曾庆鑫,等.区域森林覆盖率对其降水的影响[J].西部林业科学,2020,49(1): 72-80.
- 邢博,金爱芳,殷志强,等.基于多源数据的流域水平衡和水源涵养变化研究——以坝上高原小滦河流域为例[J].地质通报,2022,41(12): 2114-2124.
- 徐宗学,孟翠玲,巩同梁,等.西藏自治区气温变化趋势分析[J].自然资源学报,2009,24(1): 162.
- 殷志强,邢博,邵海,等.支撑赛罕坝生态屏障建设水平衡和科学绿化研究取得新认识[R].中国地质调查局《地质调查专报》,2022.
- 张井勇,董文杰,叶笃正,等.中国植被覆盖对夏季气候影响的新证据[J].科学通报,2003,48(1): 5.
- 中国气象局.地面气象观测资料质量控制 QX/T 118-2010[M].气象出版社,2010.
- 中国气象局气候变化中心.中国气候变化蓝皮书(2021)[M].北京: 科学出版社,2021.
- 左斌斌,徐宗学,任梅芳,等.北京市通州区 1966—2016 年降水特性研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2019,55(5): 556-563.