高绍鑫,常煜,孟庆娜,等.1971—2020年呼伦贝尔市积雪气候特征和未来趋势预估[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(3):78-86. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.03.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



1971—2020 年呼伦贝尔市积雪气候特征 和未来趋势预估

高绍鑫,常 煜*,孟庆娜,曲学斌,林 聪 (呼伦贝尔市气象局,内蒙古 呼伦贝尔 021008)

摘 要:利用 1971—2020 年呼伦贝尔市 16 个国家气象站最长积雪日数和最大积雪深度资料,采用经验正交函数(EOF)分析、重标极差分析(R/S)和非周期循环分析,统计最长积雪日数和最大积雪深度时间序列的 Hurst 指数、分维数和非周期循环的平均循环长度,分析最长积雪日数和最大积雪深度变化趋势和记忆周期;同时采用 MOD10A2 积雪产品,研究 2001—2018 年呼伦贝尔市积雪覆盖率变化。结果表明:(1)近50 年呼伦贝尔市最长积雪日数呈递减趋势,最大积雪深度呈递增趋势;(2)积雪深度>20、30 cm 的年平均积雪日数主要出现在1996—2014年,其中积雪深度>30 cm 年平均积雪日数>1d;(3) 呼伦贝尔市积雪初日出现在10月中旬至11月上旬,积雪终日在4月结束,积雪初日出现最早时间和积雪终日结束最晚时间都在呼伦贝尔市的北部地区;(4)R/S分析和非周期循环研究表明,呼伦贝尔市最长积雪日数和最大积雪深度 H 指数分别为0.589 9和0.889,即最长积雪日数未来减少和最大积雪深度未来增多趋势持续,持续时间分别为8和12 a;(5)呼伦贝尔市年平均积雪覆盖率为98.87%,呈波动增加趋势,空间分布呈自西北向西南和东南地区增加,10月和翌年3月增加显著,9、12月和翌年4月减少。

关键词:最长积雪日数;最大积雪深度;积雪覆盖率;重标极差分析(R/S);非周期循环分析 中图分类号:P468.025 文献标识码:A 文章编号:1002-0799(2023)03-0078-09

积雪作为冰冻圈的重要组成部分,是对气候变化响应最为敏感的要素之一[1],同时,积雪对气候变化具有重要的反馈作用[2-3]。积雪变化与水文关系密切[4],气候变化会引起积雪面积、持续时间的变化,从而导致积雪地区水资源与河川径流季节分配的变化,场而导致积雪地区水资源与河川径流季节分配的变化[5-6]。同时,积雪影响着地球陆地上中高纬度地带和高海拔地区的生态地理环境[7-9]。IPCC 第六次评估报告指出,1922—2018 年,北半球 4 月的积雪范围显著减少,为(0.29±0.07)×10⁶ km²·10 a⁻¹,1981—2018 年,北半球所有月份积雪范围都在减小,其中

作者简介:高绍鑫(1994—),女,工程师,主要从事预报预测和定量遥感研究。E-mail:<u>1194317732@qq.com</u>

通信作者:常煜(1974—),女,正高级工程师,主要从事预报预测工作。E-mail:changyu0258@163.com

11、12、3 和 5 月的缩减率均>50×10³ km²·a⁻¹,且近40年已无积雪增加的月份,减少速率也在加快,对北半球春季积雪范围减少的评估信度也更加确定[10]。因此,开展典型区域积雪变化规律研究,对明确区域气候对全球变化的响应机制具有重要指导意义[11-12]。

我国积雪分布广泛,多年平均积雪范围达900万km²,稳定积雪区面积达420万km²,主要包括三大积雪稳定区:青藏高原地区、东北和内蒙古地区、北疆和天山地区[13]。东北地区作为典型的中高纬气候脆弱带,对全球气候变化响应敏感[14],刘世博等[15]利用1979—2014年微波遥感数据分析东北冻土区积雪深度的时空变化规律及其异常变化,发现东北冻土区年平均积雪深度变化以减少为主。张旭等[16]利用FY3/VIRR1、6、10通道数据,以指数和光谱阈值相结合的多光谱积雪监测算法对2013年阿勒泰

地区卫星数据进行积雪监测处理,可探测积雪、不同云系、不同地表的响应灵敏性,实现积雪的卫星遥感监测。王力福等¹⁷⁷采用 GPS-MR 技术开展了阿勒泰地区积雪深度反演研究。范子昂等¹⁸⁸基于不同开阔度森林下积雪表明短波辐射的观测资料,分析了森林积雪短波辐射收支、短波辐射透射率特征。李海花等¹⁷⁹分析了阿勒泰积雪的变化特征及其与同期平均气温、平均0cm地面温度、降水量等气象因子的关系。韩茜等¹⁷⁰研究表明,2010年中国天山西部融雪期表层积雪的能量交换主要发生在距雪表 20cm 范围内,短波穿透辐射是表层积雪最重要的能量来源。

呼伦贝尔市位于内蒙古东北部,属于寒温带大陆性季风气候,冬季(12月—翌年2月)被积雪覆盖,大兴安岭贯穿呼伦贝尔市中部地区,西部有一级河流额尔古纳河,东部地区的甘河和诺敏河是嫩江流域上游的主要河流,因此,研究呼伦贝尔市积雪变化特征和未来趋势预估对当地水资源、生态屏障保护具有十分重要的意义。本文利用呼伦贝尔市多年连续观测的国家气象站积雪日数和积雪深度资料,采用 EOF 主成份分析、重标极差分析(R/S)和非周期循环分析对呼伦贝尔市积雪未来变化趋势和平均循环长度预估进行研究。同时,采用美国国家雪冰数据中心(NSIDC)提供的 MODIS/Terra 8 日合成积雪产品 MOD10A2 数据,分析呼伦贝尔市积雪覆盖率,为该地区积雪气候变化提供科学参考依据。

1 资料来源和方法

1.1 资料来源

所用资料包括: CIMISS 气象数据统一服务接口提取的呼伦贝尔市 1971—2021 年 16 个国家气象站年积雪日数、积雪深度资料,日积雪深度,积雪深度> 1 cm、>5 cm、>10 cm、>20 cm、>30 cm 积雪日数数据。其中年积雪日数、年积雪深度资料无缺测;日积雪深度资料缺测视为无积雪;积雪深度> 1 cm、> 5 cm、> 10 cm、> 20 cm、> 30 cm 数据仅有 3 个站在 2020 年缺测,由于> 5 cm、> 10 cm、> 20 cm、> 30 cm 积雪日数年数据不连续,无法进行相关的差值处理,因此本文对缺测的 3 个站点数据视为无积雪,因此,本研究中 2020 年积雪深度> 5 cm、> 10 cm、> 20 cm、> 30 cm 积雪日数较实况偏小。

积雪遥感数据采用美国国家雪冰数据中心 (NSIDC) 提供的 MODIS/Terra8 日合成积雪产品 MOD10A2,时间序列为 2001—2018 年,空间分辨率 为 500 m。覆盖研究区每期需要四景影像,行列号分

别为h25v03、h25v04、h26v03、h26v04。使用 MRT 软件进行拼接、投影转换和重采样,并裁剪出研究区影像,得到每 8 d 一幅的积雪数据。采用最大合成法分别得到月积雪数据和年积雪数据。

1.2 定义

选取呼伦贝尔市各站逐年积雪日数中最大值定义为该年的最长积雪日数,逐年积雪深度中最大值定义为该年的最大积雪深度。16个国家气象站年积雪日数>1(5、10、20、30)cm 积雪日数总和除以站次定义为该年积雪深度>1(5、10、20、30)cm 年平均积雪日数。选取当年7月一翌年6月作为一个积雪观测年,以此类推得到1971—2020年共50a的时间序列,积雪初日为逐站每个积雪观测年内首次出现积雪深度≥1cm的日期;积雪终日为逐站每个积雪观测年最后出现积雪深度≥1cm的日期,计算方法见文献^[21]。

1.3 方法

1.3.1 重标极差法 R/S

由重标极差法 R/S 计算得出的 Hurst 指数 H、分维数 D 值有以下情况: 当 H=0.5,D=1.5 时,过去的增量与未来的增量不相关;当 0.5<H<1,1<D<1.5 时,表示过去的增量与未来的增量呈现正相关;当 0<H<0.5,1.5<D<2 时,表示过去的增量与未来的增量呈现负相关;当 H=1 时,完全预测,表示所分析的时间序列为完全确定的时间序列 $^{[22-23]}$ 。

1.3.2 非周期循环方法

非周期循环方法通过检验 R/S 分析稳定性的统计量 V 来度量时间序列的平均循环长度,判断序列是否有非周期性循环,且能测定出平均循环长度,即过去的趋势能对将来的事情产生影响的时间长度。 V 图像由上升(下降)向水平发生突变,即 H 由不等于 0.5 向等于 0.5 转变,此点即为长期记忆耗散点或拐点,长期记忆过程从此消失,该点所对应的时间长度即为非周期循环的平均循环长度,即系统通常在多长时间后完全失去对初始条件的依赖[^{12,24]}。

1.3.3 EOF 经验正交函数分析方法和 M-K 突变检验方法

利用 EOF 经验正交函数分析方法^[23],对呼伦贝尔市积雪日数和最大积雪深度进行空间特征分析。 利用 M-K 突变检验方法^[23]对呼伦贝尔市最长积雪日数和最大积雪深度进行显著性检验。

1.3.4 提取积雪参数

积雪覆盖率(Snow Cover Percentage, $S_{\mathbb{CP}}$)表征相对积雪面积,是研究区总像元中积雪像元数所占百分比,计算公式为:

$$S_{\rm CP} = \frac{P_{\rm s}}{P} \times 100\%$$
 . (1)

式中: P_s 代表研究区内积雪像元数,P代表研究区总像元数。

积雪覆盖频率(Snow Cover Frequency, S_{CF})表征 积雪覆盖的持续体征^[26],是一定时间尺度下的积雪 像元累积出现次数与总统计次数的比率,计算公式为:

$$S_{\text{CFJ}} = \frac{\sum_{j=1}^{J_{\text{max}}} i f_{\text{_snow}}(j)}{j_{\text{max}}} \times 100\% \quad . \tag{2}$$

其中: S_{CF} 代表统计时段内像元j的积雪覆盖频率, $if_{\text{snow}}(j)$ =1代表该像元有积雪覆盖, $if_{\text{snow}}(j)$ =0代表该像元没有积雪覆盖, j_{max} 代表统计时段内像元j的统计总次数。

2 最长积雪日数和最大积雪深度变化特征

2.1 年变化

200 70 60 · 表生深度/gru 140 50 80 60 1980 2000 1980 1990 2000 1970 2010 -0F終決量 ----- UB経済量----- 0.05以業件水等 2020 네-1970 1980 1990 2000 2010 2020年 1970 1980 1990 2000 2010 50°N 50°N

图 1 1971—2020 年呼伦贝尔市积雪日数和深度变化特征

(a 为最长积雪日数年变化;b 为最大积雪深度年变化;c 为最长积雪日数 M-K 突变检验;d 为最大积雪深度 M-K 突变检验; e 为最长积雪日数空间分布,单位:d;f 为最大积雪深度空间分布,单位:cm)

近50年呼伦贝尔市逐年最长积雪日数年变化 呈递减趋势(图 1a),特别是 2016—2020 年最长积 雪日数减少更加明显。在20世纪70年代,最长积雪 日数平均为 174.6 d, 20 世纪 80 年代、90 年代和 21 世纪 00 年代分别为 169.2、169.4、170.1 d,有小幅增 加,但 2011—2020 年,迅速递减到 104.6 d。同时也 可以看出,1970-2015年,最长积雪日数呈逐年缓 慢递减,最长积雪日数最大值出现在1984年,>191d, 最长积雪日数最小值出现在 1990 年, 为 153 d; 2016-2020年最长积雪日数迅速递减,最长积雪日 数最小值为 64 d, 出现在 2017 年, 最大值为 154 d, 出现在 2019 年。2016—2020 年,最长积雪日数最大 值 154 d 基本与 1971—2015 年的最长积雪日数最 小值 153 d 持平。M-K 突变检验显示呼伦贝尔市最 长积雪日数减少趋势自 1990 年后通过 0.05 的显著 性水平检验,突变发生在 2013 年(图 1c)。

近50年呼伦贝尔市最大积雪深度年变化与积

雪日数年变化呈相反特征(图 1b),即最大积雪深度呈递增趋势,年平均递增率为 0.03 cm·a⁻¹,最大积雪深度最大值出现在 1979 年,>73 cm,最大积雪深度最小值出现在 2015 年,为 19 cm。近 50 年呼伦贝尔市最大积雪深度最大值年代出现在 20 世纪70 年代,平均值为 35.9 cm·a⁻¹,最大积雪深度最小值年代出现在 20 世纪 80 和 90 年代,平均值均为 28.7 cm·a⁻¹。进入 21 世纪后,呼伦贝尔市最大积雪深度开始递增,21 世纪 00 年代,呼伦贝尔市最大积雪深度平均值为 34.9 cm·a⁻¹,仅次于 1971—2020 年最大积雪深度最大值(20 世纪 70 年代)。M-K 突变检验显示呼伦贝尔市最大积雪深度增多趋势在 2002 年开始明显,且在 2013 年通过 0.05 的显著性检验,突变发生在 1999 年(图 1d)。

由 1971—2020 年呼伦贝尔市最长积雪日数和最大积雪深度空间分布可知,最长积雪日数自呼伦贝尔市北部地区向东南部地区递减(图 1e),在北部地区最长积雪日数> 184 d,东南地区最长积雪日数< 128 d;最大积雪深度自呼伦贝尔市东北地区向西南和东南地区递减(图 1f),在东北地区最大积雪深度> 70 cm,西南地区和东南地区的最大积雪深度分别< 20、30 cm。

近 50 年呼伦贝尔市最长积雪日数和最大积雪深度 EOF 主成分分析表明,最长积雪日数第一特征向量和第二特征向量方差贡献分别为 75.5%和 7.6%,最大积雪深度第一特征向量和第二特征向量的方差贡献分别为 38.8%和 14.9%。

图 2 为 1971—2020 年呼伦贝尔市最长积雪日数和最大积雪深度 EOF 主成分分析,从图中可以看出:最长积雪日数 EOF 第一特征向量表现为全市一致性特征(图 2a),> 0.92 的高值区出现在呼伦贝尔市中部偏南地区,说明该区域为呼伦贝尔市最长积雪日数变化最敏感的地区,最长积雪日数 EOF 第二特征向量表现为北少南多特征(图 2b),而且北部偏北地区和南部偏南地区为变化最敏感的地区;最大积雪深度与最长积雪日数 EOF 特征分布基本一致,第一特征向量表现为全市一致性特征(图2c),第二特征向量为北多南少特征(图 2d),而且第一特征向量和第二特征向量最为敏感的地区分别为呼伦贝尔市的中部偏南地区和呼伦贝尔市北部、南部地区。

2.2 不同量级积雪深度年变化

由近 50 a 呼伦贝尔市积雪深度>1、5、10、20、30 cm 的年平均积雪日数变化特征(图 3)可知,1971—2010 年,积雪深度<20 cm 的年平均积雪日数在较平稳的小幅波动中变化,但在 2010—2014 年积雪深度>1、5、10、20 cm 的年平均积雪日数均有所增加,特别是积雪深度>1、5、10 cm 的年平均积雪日数基本增加了 20~30 d,2015—2020 年积雪深度<20 cm 的年平均积雪日数又恢复到 1971—2010年波动水平;1971—1995 年,积雪深度>20 cm 的年平均积雪日数在较平稳的小幅波动中变化,但在1996—2014 年,积雪深度>20 cm 的年平均积雪日数显著增多;积雪深度>20 cm 的年平均积雪日数显著增多;积雪深度>30 cm 的年平均积雪日数、1 d 主要出现在 1972—1973、1996—2014 年,特

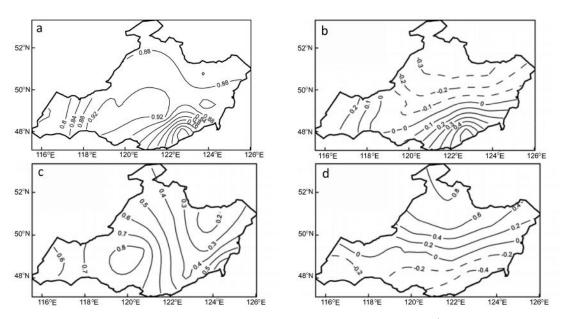


图 2 1971—2020 年呼伦贝尔市积雪 EOF 主成分分析 (a,b)为最长积雪日数;c,d)为最大积雪深度;a,c)为第一特征向量;b,d)为第二特征向量)

别是在 1996-2014 年,基本表现为持续增多的特 征。由此可见,2000-2014年,呼伦贝尔市积雪深度 增大, 主要是积雪深度>30 cm 的积雪日数增多,特 别是在 2010—2014 年, 呼伦贝尔市积雪深度> 1、 >5、>10、>20 cm 积雪日数也同时增多。可见,在全球 变暖背景条件下, 我国北方地区更易发生极端降雪 天气,导致积雪深度增加。

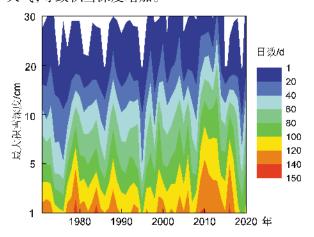


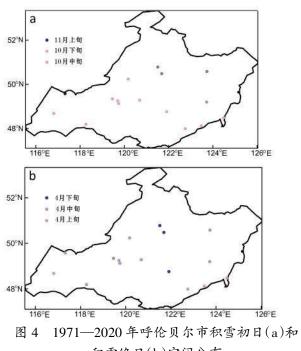
图 3 1971—2020 年呼伦贝尔市积雪深度>1、>5、 >10、>20、>30 cm 年平均积雪日数变化

2.3 积雪初日和积雪终日年变化

由近50 a 呼伦贝尔市积雪初日和积雪终日变 化(图 4)可知,呼伦贝尔市积雪初日出现在 10 月中 旬一11月上旬(图 4a), 其中积雪初日最早出现在 10月中旬,主要出现在呼伦贝尔市中部和北部地 区,10月下旬呼伦贝尔市南部地区开始出现积雪, 在呼伦贝尔市西北地区的满洲里市积雪初日出现时 间最晚,为11月上旬。呼伦贝尔市积雪终日主要集 中在 4 月(图 4b),其中在呼伦贝尔市西南部和东南 部地区积雪终日结束时间最早,为4月上旬,其次为 呼伦贝尔市西部偏东北和东部偏北地区,为4月中 旬,在呼伦贝尔市中部偏北地区积雪终日结束时间 最晚,主要集中在4月下旬。

3 最长积雪日数和最大积雪深度 R/S 分析

为了进一步了解呼伦贝尔市最长积雪日数和最 大积雪深度未来变化趋势, 采用重标极差法 R/S 计 算得出积雪日数和最大积雪深度的 Hurst 指数 H、 分维数 D 值。由图 5a 可知,呼伦贝尔市最长积雪日 数的 H 值为 0.589 9, H 值和 D 值均符合 0.5 < H < 1 和 1 < D < 1.5, 说明最长积雪日数未来的趋势和过 去的减少呈正相关,未来呈减少趋势,但从呼伦贝尔 市最长积雪日数的H值空间分布可知(图5c),在呼



积雪终日(b)空间分布

伦贝尔市西部偏东地区 H < 0.5, 说明该区域的最长 积雪日数未来趋势和过去趋势呈负相关, 即该区域 最长积雪日数在未来为增多趋势, 在呼伦贝尔市其 余的大部分地区最长积雪日数 H > 0.5, 未来仍维持 减少趋势。由图 5b 可知,呼伦贝尔市最大积雪深度 H 值为 0.889, H 值和 D 值均符合 0.5 < H < 1 和 1 < D<1.5, 说明最大积雪深度过去增多趋势在未来仍 将持续, 从最大积雪深度 H 值空间分布 (图 5d)可 知,全市H指数均>0.5,说明全市最大积雪深度在 未来仍为增多趋势,但值得关注的是,在呼伦贝尔市 中部地区的H=1,出现完全预测特征,表示所分析的 时间序列为完全确定的时间序列,是未来最大积雪 深度增多最显著的区域。

4 最长积雪日数和最大积雪深度非周期循环分析

1971-2020 年呼伦贝尔市最长积雪日数时间 序列统计量 Vn 关于 ln(n)的曲线呈上升趋势(图 6a),第一个时间拐点出现在 ln(n)=2.07 处,其所对 应的时间长度为 8 a, 说明呼伦贝尔市最长积雪日 数的时间序列的变化趋势具有持续性特征,持续减 少的时间长度为 8 a。但最长积雪日数时间序列统 计量 Vn 关于 ln(n)的曲线在 ln(n)=2.19 处(对应 的时间长度为 9 a)以后,Vn 关于 ln(n)的折线在平 缓中存在显著波动, 因此呼伦贝尔市最长积雪日数 虽然呈减少趋势, 但在未来积雪日数减少趋势持续 性较弱。

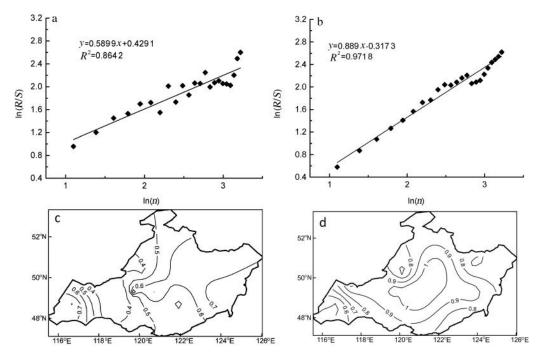


图 5 1971—2020 年呼伦贝尔市最长积雪日数(a,c)和最大积雪深度 R/S 分析(b,d)

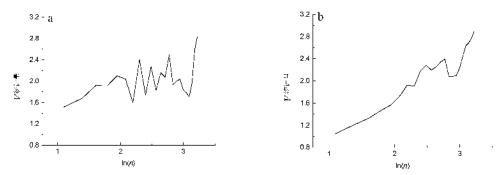


图 6 1971—2020 年呼伦贝尔市最长积雪日数(a)和最大积雪深度(b)时间序列 R/S 的 V 统计量相对于 $\ln(n)$ 的变化曲线

1971—2020 年呼伦贝尔市最大积雪深度时间序列统计量 Vn 关于 ln(n)的曲线型态表现为持续的上升趋势(图 6b),第一个时间拐点出现在 ln(n)=2.28 处,其所对应的时间长度为 12 a,说明呼伦贝尔市最大积雪深度的时间序列的变化趋势具有持续性特征,12 a 后将失去对初始条件的依赖,最大积雪深度未来增多趋势的持续性较强。

5 积雪覆盖率变化

5.1 年际变化

由 2001—2018 年呼伦贝尔市逐年总积雪覆盖率年变化(图 7a)可知,近 18 a 总积雪覆盖率呈波动中增加趋势,年平均积雪覆盖率为 98.87%,而且每年的总积雪覆盖率均在 98%以上,总积雪覆盖率最少的年份出现在 2008 年,为 98.13%,其次是 2001年,为 98.43%,总积雪覆盖率最多的年份 2011年,

为 99.09%。

统计分析 2001—2018 年逐 8 d 的积雪覆盖率 如图 7b 所示,积雪覆盖率整体呈现自西北向西南和 东南增加的趋势,其中东部地区和西部偏南地区的 积雪覆盖率较高。东部地区为山地—平原过渡地带,西部偏南为呼伦贝尔草原,由此可见,相对平坦的地势有利于积雪的积累。

5.2 年内变化

2001—2018 年呼伦贝尔市平均积雪覆盖率的年内变化如图 8a 所示。近 18 年平均积雪覆盖率年内变化呈单峰型,峰值为 93.29%,出现在 1 月,谷值为 0%,出现在 6—8 月。具体来看,呼伦贝尔市平均积雪覆盖率从 9 月开始增加,10 月—翌年 2 月迅速增加,4 月开始明显下降,5 月在少数年份能监测到积雪,6、7、8 月没有监测到积雪。

统计分析 2001-2018 年呼伦贝尔市秋季(8b)、

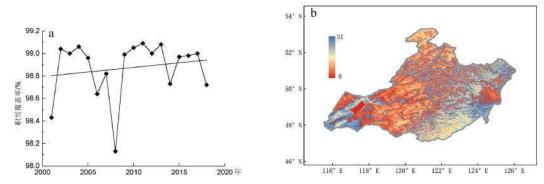


图 7 2001—2018 年呼伦贝尔市积雪覆盖率最大合成的(a)年际变化和(b)积雪覆盖率空间分布

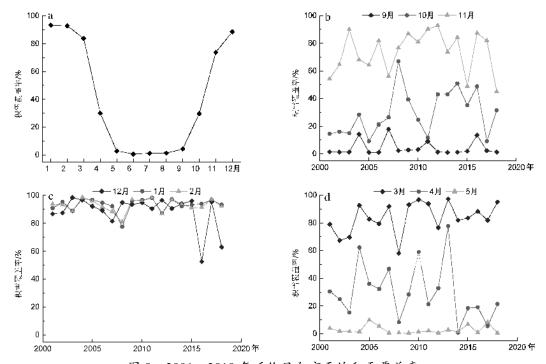


图 8 2001—2018 年呼伦贝尔市平均积雪覆盖率 (a 为年内变化;b 为秋季;c 为冬季;d 为春季)

冬季(8c)和春季(8d)的积雪覆盖率可知,9月一翌年5月各月积雪覆盖率线性方程斜率依次为-0.0241(9月)、1.1737(10月)、0.2054(11月)、-0.8218(12月)、0.0935(1月)、0.0506(2月)、0.8108(3月)、-0.9051(4月)、0.0005(5月),即近18a呼伦贝尔市积雪覆盖率在9、12、4月呈减少趋势,在秋季、冬季、春季的其余月份为增多趋势。其中减少最明显的月份为4月,增多最明显的月份为10月。说明在气候变暖的大气候背景条件下,呼伦贝尔市积雪融化将有所提前,同时也可以看出在10月和翌年的3月是中高纬度地区冷暖空气交替最为频繁的时段,发生极端降雪事件的概率也较高。

6 结论和讨论

利用 1971-2020 年呼伦贝尔市 16 个国家气象

站最长积雪日数和最大积雪深度资料,采用经验正交函数(EOF)分析、重标极差分析(R/S)和非周期循环分析,统计最长积雪日数和最大积雪深度时间序列的 Hurst 指数、分维数和非周期循环的平均循环长度,分析降水量变化趋势和记忆周期,同时利用MOD10A2 数据,研究呼伦贝尔市 2001—2018 年积雪覆盖率变化,结果如下:

(1)1971—2020 年呼伦贝尔市最长积雪日数 呈递减趋势,但最大积雪深度呈递增趋势,且递减 趋势和递增趋势最明显的年份都出现在 21 世纪,其 中变化最敏感地区分别出现在呼伦贝尔市中部偏南 地区和偏北、偏南地区。

(2) 呼伦贝尔市积雪深度>1 cm、>5 cm、>10 cm、>20 cm、>30 cm 积雪日数都呈现增多趋势,特别是在1996—2014年,积雪深度>20 cm、>30 cm 的积

雪日数增多明显,2010—2014年,积雪深度> 1 cm、> 5 cm、> 10 cm 积雪日数也开始明显增多。

- (3)R/S 分析和非周期循环研究表明,呼伦贝尔市最长积雪日数和最大积雪深度过去的减量(增量)与未来的减量(增量)都呈正相关,即最长积雪日数未来将继续减少、最大积雪深度未来将继续增加,持续时间分别为8和12a。
- (4)呼伦贝尔市积雪初日出现在 10 月中旬—11 月上旬,积雪终日出现在 4 月,其中在呼伦贝尔市北 部地区积雪初日出现时间最早,积雪终日结束时间 最晚。
- (5)2001—2018 年呼伦贝尔市总积雪覆盖率呈波动中增加趋势,空间分布呈自西北向西南和东南增加;积雪覆盖率减少最明显的月份为 9、12 月和翌年 4 月,其余月份为增多趋势,其中 10 月和翌年 3 月增多显著。

本文研究了呼伦贝尔市积雪气候演变和未来趋势预估,不足之处是缺少对呼伦贝尔市积雪日数减少但积雪深度却增加的成因分析,因此,今后将开展呼伦贝尔市积雪与冻土、降雪、气温等气象要素的相关性分析,希望通过此途径能获得呼伦贝尔市积雪日数减少但积雪深度增加的成因。

参考文献:

- [1] 刘一静,孙燕华,钟歆玥,等.从第三极到北极:积雪变化研究进展[J].冰川冻土,2020,42(1):140-156.
- [2] 李雪梅,高培,李倩,等.中国天山积雪对气候变化响应的 多通径分析[J].气候变化研究进展,2016,12(4):303-312.
- [3] 王澄海,王芝兰,崔洋.40 余年来中国地区季节性积雪的 空间分布及年际变化特征[J].冰川冻土,2009,31(2): 301-310.
- [4] 崔彩霞,魏荣庆,李杨.塔里木河上游地区积雪长期变化 趋势及其对径流量的影响[J].干旱区地理,2005,28(5): 569-573.
- [5] 李培基.新疆积雪对气候变暖的响应[J].气象学报,2001,59(4):491-501.
- [6] 李培基.1951—1997 年中国西北地区积雪水资源的变化 [J].中国科学(D辑),1999,29(增);63-69.
- [7] 罗继,路学敏.2004—2009 年阿克苏地区积雪分布特征 及其对春季径流的影响[J].沙漠与绿洲气象,2011,5(5): 35-38.
- [8] 黄健,马雷凯.积雪和冬季气候条件对棉铃虫年发生程度的影响[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(5):25-28.
- [9] 杨蕾,秦莉,刘可祥,等.新疆伊犁南部山区树木径向生长

- 对积雪变化的响应[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(1):78-86.
- [10] 钟歆玥,康世昌,郭万钦,等.最近十多年来冰冻圈加速萎缩—IPCC第六次评估报告之冰冻圈变化解读[J].冰川冻土,2021,43(6):1-8.
- [11] 路倩,李宝富,王志慧,等.1979—2014 年东北地区雪深时空变化与大气环流的关系[J].冰川冻土,2018,40(5):907-915.
- [12] 侯小刚,李帅,张旭,等.基于 MODIS 积雪产品的中国天山山区积雪时空分布特征研究[J].沙漠与绿洲气象, 2017,11(3):9-16.
- [13] 李培基,米德生.中国积雪的分布[J].冰川冻土,1983,5 (4):9-18.
- [14] 冯滢瑛,李卓仑.1957—2007 年东北地区负积温时空演 变[J].冰川冻土,2016,38(6):1529-1537.
- [15] 刘世博,藏淑英,张丽娟,等.东北冻土区积雪深度时空变化遥感分析[J].冰川冻土,2018,40(2):261-269.
- [16] 张旭,杨志华,杨昌军,等.基于 FY3/VIRR 数据的积雪 遥感监测分析[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(3):83-88.
- [17] 王力福,张双成,张成龙,等.地基 GPS 用于阿勒泰积雪 深度反演研究[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(1):93-98.
- [18] 范子昂,陆恒,刘兆旭,等.中国天山西部森林积雪短波 辐射收支特征[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(5):136-143
- [19] 李海花,刘大锋,李杨,等.近 33a 新疆阿勒泰地区积雪 变化特征及其与气象因子的关系[J].沙漠与绿洲气象, 2015,9(5);29-35.
- [20] 韩茜,刘明哲,陆恒.融雪期中国天山西部山地表层积雪能量收支特征[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(3):39-46.
- [21] 王慧,王梅霞,王胜利,等.1961—2017 年新疆积雪期时 空变化特征及其与气象因子的关系[J].冰川冻土,2021, 43(1):61-69.
- [22] 李国栋,张俊华,王乃昂,等.基于重标极差分析和非周期循环分析的气候变化趋势预测—以兰州市为例[J].干旱区研究,2013,30(2):299-307.
- [23] HURST H E. The problem of long term storage in reservoirs [J]. International Association of Scientific Hydrology, 1956, 1(3):13–27.
- [24] 王小东.PETERS E.资本市场的混沌和秩序[M].北京:经济科学出版社,1999:54-95.
- [25] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:北京 气象出版社,2007:63-66.
- [26] 秦艳,丁建丽,赵求东,等.2001—2015 年天山山区积雪时空变化及其与温度和降水的关系[J].冰川冻土,2018,40(2):249-260.

Climatic Chracteristics of Snow Cover during 1971–2020 in Hulun Buir City and Future Trend Prediction

GAO Shaoxin, CHANG Yu, MENG Qingna, QU Xuebin, LIN Cong (Hulun Buir Meterological Bureau, Hulun Buir 021008, China)

Abstract The longest snow cover days (LSCD) and maximum snow depth(MSD) data of 16 national stations in Hulun Buir were used to calculate the values of Hurst, fractal dimension and non-cycle average cycle length, as well as variation trends and memory cycles of snow cover, using EOF, R/S analysis and non-periodic cycle analysis. The snow cover percentage and frequency were studied using MOD10A2 from 2001 to 2018 in Hulun Buir. The results showed that: (1) In recent 50 years, LSCD in Hulun Buir showed a decreasing trend, while MSD increasing (2) The days when snow depth was greater than 20 cm and 30 cm mainly occurred from 1996 to 2014. The annual average snow cover days with snow depth over 30 cm exceeded 1 day. (3) Initial snow cover date in Hulun Buir mainly occurred in mid-October to early November, while final snow cover date in April. The earliest initial snow cover date and the latest final snow cover date were all in the northern area of Hulun Buir. (4)R/S and non-periodic cycle analysis showed that the H index of LSCD and MSD in Hulun Buir city were 0.589 9 and 0.889 respectively, indicating the decreasing trend of LSCD and increasing trend of MSD in the future. The durations were 8 years and 12 years respectively. (5) The annual average of the snow cover percentage in Hulun Buir was 98.87% with a fluctuating increasing trend. The snow cover percentage increased from northwest to southwest and southeast. The snow cover percentage significantly increased in October and next March, while decreased in September, December and next April.

Key words longest snow cover days; maximum snow depth; snow cover; rescaled range analysis (R/S); non-periodic cycle analysis