

锡林河流域降雪集中度集中期变化特征

王 飞, 朱仲元, 郝祥云, 韩冬冬, 王慧敏

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘 要:利用 1970—2016 年锡林河流域 4 个国家气象站台的冬季降水资料, 计算了流域的降雪集中度(PCD)、集中期(PCP), 并采用线性趋势分析、Morlet 小波、Mann-Kendall 突变分析及 R/S 分析等方法, 研究了流域近 50 年降雪集中度、集中期的变化特征。结果表明: 锡林浩特站降雪较为集中, 而阿巴嘎旗站降雪最不集中。流域降雪南部较北部更加集中, 集中度增减趋势则呈东增西减之势; 流域大部分站点都存在 12 月上旬这一个共同的集中期, 集中期偏早年较多。集中度存在以 25 a 左右为主的周期变化, 在此周期内降雪会经历集中—不集中—集中的交替变化, 集中期的变化以 24 a 为主周期, 在主周期内存在早—晚—早交替变化, 且 2016 年以后集中期仍处在偏早期。流域各站的集中度在未来年变化趋势均表现为反持续性。

关键词:锡林河流域; 集中度; 集中期; 周期分析; R/S 分析

中图分类号: P426.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)03-0239-09

Variation Characteristics of Snowfall Concentration Period in Xilin River Basin

WANG Fei, ZHU Zhongyuan, HAO Xiangyun, HAN Dongdong, WANG Huimin

(College of Water Resources and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: The snowfall concentration (PCD), concentration period (PCP) of the basin was calculated by using the winter precipitation data of four national meteorological stations in the Xilin River Basin from 1970 to 2016, and linear trend analysis, Morlet wavelet, Mann-Kendall mutation analysis and R/S analysis methods were used to study the variation characteristics of snowfall concentration and concentration period in the basin over the past 50 years. The results showed that the snowfall at Xilinhot Station was relatively concentrated, while the snowfall at Abaqi Banner was the least concentrated, the southern part of the basin was more concentrated than the north, and the trend of increasing or decreasing concentration was increasing eastward and westward. Snowfalls in most of the stations in the basin had a common concentration period in early December, and the concentration period was more early in the early years. There is a cyclical change with concentration of about 25-year period. During this period, snowfall underwent alternating-concentration-concentration alternating changes. The concentration period changed with 24-year period as the main cycle, and there was early-late-early alternation in the main cycle. Changes and the concentration period after 2016 will be still in the early stages. The snowfall concentration of stations in the basin will be anti-sustainability in the future.

Keywords: Xilin River Basin; concentration; concentration period; period analysis; R/S analysis

在全球变暖的背景下, 极端天气、气候事件的发生, 呈现增多、增强的趋势。降雪作为降水的特殊形式, 若以极端事件出现就会产生暴雪, 暴雪是北半球常见的灾害性天气。所以降雪特别是暴雪已成为各国学者研究的热门问题^[1-4]。在我国对降雪的研究也有很丰硕的成果, 主要集中在我国青藏、新疆及内蒙古地区。如周陆生等^[5]确定了青藏高原降雪成灾几率的高值中心, 并计算出冬季与春季降雪成灾几率。

杨莲梅等^[6]应用新疆北部和天山山区 50 个气象站 1961—2002 年冬季降水资料, 揭示了新疆牧区大、暴雪过程的时、空分布特征和年际变化, 找到了该地区 4 个大、暴雪过程高频区。并发现大、暴雪过程在 20 世纪 80 年代以前偏少, 在 20 世纪 80 年代以后偏多; 赵俊荣等^[7]分析了天山北坡中部地区发生的一场罕见特大暴雪, 并研究了其特征及形成的原因。江毅等^[8]对内蒙古 111 个测站日降雪量 ≥ 5 mm 的资料

作了统计分析发现内蒙古大(暴)雪的异常发生区与降雪量高值区一致,异常最突出的区域主要集中在 $40^{\circ}\text{--}45^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{--}123^{\circ}\text{E}$ 范围内。10—11 月的降雪异常变化对冬季的总降雪异常变化贡献最大。宫德吉等^[9]分析了内蒙古大(暴)雪及白灾的空间分布,结果表明发生大(暴)雪频率最高的地区是内蒙古的东部和南部,而白灾最重的地区却是内蒙古北部。研究大多集中于发现降雪的空间特征,但在时间上,特别是形成雪灾的短时段集中降雪研究较少。

锡林河位于内蒙古自治区锡林郭勒草原,锡林郭草原属大陆性温带半干旱大陆性气候是典型的寒旱区草原,降水稀少,根据中国地面气候资料日值数据集流域内锡林浩特站 1970—2016 年逐日气象资料统计表明,该站降雪量占全年降水量 19.2%。因此对锡林河流域降雪进行系统的研究是十分必要的。目前,在锡林河流域对降雪过程的研究多集中于降雪发生后对积雪深度,积雪面积,积雪日数的研究^[10-12],对流域降雪的集中度与集中期的还缺少研究。王冀等^[13]的研究表明降雪集中度可很好的反映降雪的变化规律,且其对降雪量具有很好的指示作用。所以本文对锡林河流域的降雪集中度(precipitation concentration degree,PCD)和集中期(precipitation concentration period,PCP)的变化特征进行分析研究,同时对冬季降雪进行趋势预测,旨在深化对锡林河降雪规律的研究,提高冬季降雪的预报、预测能力,以期为其他相关科学研究提供一定参考。

1 资料及方法

1.1 数据资料

由于研究区锡林河流域气象站点稀少气象资料稀缺,单站的气象资料系列短数据量不足,缺少代表性,故

选取锡林河流域的阿巴嘎旗、锡林浩特、林西县国家气象站和距离流域最近的西乌珠穆沁旗国家气象站 1970—2016 年降雪期(10 月至翌年 4 月)的降水资料。

1.2 集中度(PCD)与集中期(PCP)

为方便研究将降雪期(10 月至翌年 4 月)各月分为上、中、下三旬,每旬又分两候,候是根据研究系列长度按升序排列。锡林河流域的降雪期共 7 个月,所以可以将降雪期分为 42 各候。将降雪期看作个圆,各候按顺序均匀分布,所以每一候都有一个对应的方位角。计算集中度、集中期实际上要把降雪期某候的降雪量作为该降雪矢量的模,研究时段看作是一个圆周,该候与圆上 0° 的夹角为该矢量的方向,将多个候的降雪矢量进行合成。合成后的模与总降雪量的比值定义为集中度,合成后的矢量方位角定义为集中期。降雪集中度(PCD)和集中期(PCP)的公式如下^[13-15]:

$$\text{PCD}=\frac{\sqrt{R_{xi}^2+R_{yi}^2}}{R_i} \tag{1}$$

$$\text{PCP}=\arctan\left(\frac{R_{xi}^2}{R_{yi}^2}\right) \tag{2}$$

式中:PCD 和 PCP 分别为研究时段内降雪期的集中度和集中期; $R_{xi}=\sum_{j=1}^n r_{ij} \cdot \sin\theta_j$; $R_{yi}=\sum_{j=1}^n r_{ij} \cdot \cos\theta_j$; R_i 为站点降雪期总降雪量; r_{ij} 为降雪期某候的降雪量; θ_i 为降雪期各候对应的方位角; i 为研究的年份(1970—2016 年); j 为降雪期的候序(1,2,⋯,42)。集中度(PCD)反映的是降雪期内的降雪总量该时段内各个候的集中程度,取值在 0~1. 其越接近 1 表示降雪越集中在某一候内;集中期(PCP)是向量合成后重心所指示的角度,所以能够反映降雪期内降雪集中在哪一个候内^[16],具体见表 1。

表 1 锡林河流域降雪期月旬、候对照 候

旬	10 月		11 月		12 月		1 月		2 月		3 月		4 月	
上	1	2	7	8	13	14	19	20	25	26	31	32	37	38
中	3	4	9	10	15	16	21	22	27	28	33	34	39	40
下	5	6	11	12	17	18	23	24	29	30	35	36	41	42

1.3 集中期、集中度变化规律研究方法

本文对降雪期降雪集中度、集中期在时间尺度上的研究主要采用了线性趋势分析、Morlet 小波分析的方法,又对集中度、集中期的变化作 Mann-Kendall 突变分析,其原理方法详见参考文献[17-21]。对未来降雪期集中度的变化趋势预测中运用了 R/S 分析方法(赫斯特指数),R/S 分析法又称 Hurst 系数法是英国水文学家赫斯特(Hurst)在总结尼罗河多年水文观测资料时提出的,其能对未来水文气象要素变化的总体做出断和预测。该方法是通过改变水文气象序列的时间尺度大小,在不同尺度范围内研究该序列的统计规律,从而完成了大小时间尺度的相互转

换,以达到对未来的推断和预测的目的^[22]。
其原理如下:考虑一个时间序列 $\{X(t)\}$, $t=1,2,\cdots$,对于任意正整数
 $\tau\geqslant 1$,定义均值序列:
$$\overline{X}_{\tau}=\frac{1}{\tau}\sum_{i=1}^{\tau}X(t) \quad (\tau=1,2,\cdots,n) \tag{4}$$

用 $\zeta(t)$ 表示累积离差
$$\zeta(t,\tau)=\sum_{u=1}^t(X(u)-\overline{X}_{\tau}) \quad (1\leqslant t\leqslant \tau) \tag{5}$$

极差 R 定义为
$$R(\tau)=\max_{1\leqslant t\leqslant \tau}\zeta(t,\tau)-\min_{1\leqslant t\leqslant \tau}\zeta(t,\tau) \quad (\tau=1,2,\cdots,n) \tag{6}$$

标准差 S 定义为

$$s(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{u=1}^{\tau} (X(u) - \bar{X}_{\tau})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\tau=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

现在考虑比值 $R(\tau)/S(\tau)=R/S$, 对于给定的序列, 任何长度 τ 的 R/S 均可统计计算。

$$R/S = (c\tau)^H \quad (8)$$

对上式取对数可得:

$$\ln[R(\tau)/S(\tau)] = H(\ln c + \ln \tau) \quad (9)$$

用最小二乘法可求得参数 c 和 Hurst 系数 H 。如果 H 大于 0.5 时, 表示序列未来的变化趋势与过去相同, 整个系列变化具有持续性, 且 H 越接近于 1 持续性越强。如果 H 小于 0.5 时, 表明未来变化趋势与过去相反, 整个系列变化具有反持续性, 这种情况下越接近 0 反持续性越强。如果 H 等于 0.5, 表示未来变化趋势与过去无关, 变化具有独立性^[23-24]。

2 结果与分析

2.1 降雪集中度(PCD)集中期(PCP)的年代变化

由锡林河流域各站点 PCD 逐年变化曲线(图 1)可以看出, 锡林浩特、阿巴嘎旗、西乌珠穆沁旗、林西县站点的 PCD 变化范围分别为 0.2~0.94, 0.11~0.61, 0.045~0.75, 0.16~0.95。观察发现锡林浩特站与林西县站比阿巴嘎旗站与西乌珠穆沁旗站冬季降雪时间更为集中。各站的 PCD 最小值均在 1970 年出现, 故锡林

河流域在 1970 年冬季降雪最不集中。各站点 PCD 均值分别为 0.502, 0.360, 0.448, 0.456, 锡林浩特站最大, 冬季降雪最为集中, 阿巴嘎旗最小, 降雪最不集中。从其站点位置图可看出流域 PCD 表现为流域南部大于北部, 所以锡林河流域南部冬季降雪较北部更加集中。若将 PCD 大于流域各站点多年平均值的年份认为是降雪集中年份, 反之, 则认为降雪不集中年份。发现全流域降雪集中年占总研究时间系列的 46.809%, 锡林浩特降雪集中年占 63.830%, 阿巴嘎旗降雪集中年占 29.787%, 西乌珠穆沁旗占 46.809%, 林西县站 63.830%。观察图 1 集中度线性趋势线可得出, 锡林浩特站与阿巴嘎旗站的降雪集中度变化趋势呈增长趋势, 而西乌珠穆沁旗与林西县站呈下降趋势。

图 2 反映的是锡林河流域各站点集中期(PCP)逐年变化, 对照表 1 可得出: 锡林浩特站降雪多集中与 12 月中旬到翌年 1 月上旬, 阿巴嘎旗与西乌珠穆沁旗站冬季降雪多集中于 11 月下旬到 12 月中旬, 林西县站则就集中于 2 月一个月; 林西县 PCP 呈变大趋势, 即降雪集中时间段降雪期内向后推迟, 但变化速度较慢, 速度为每年推迟 0.02 个候, 流域其他 3 个站点降雪集中期呈现出提前的变化趋势, 其中锡林浩特、西乌珠穆沁旗提前的速度较快, 速度分别为每年提前 0.154 个候与每年提前 0.277 个候。若定义 PCP 大于多年平均值, 的年份为 PCP 偏晚年, 反之则为偏早年, 可得对全流域而言, PCP 偏晚年 46.56%。

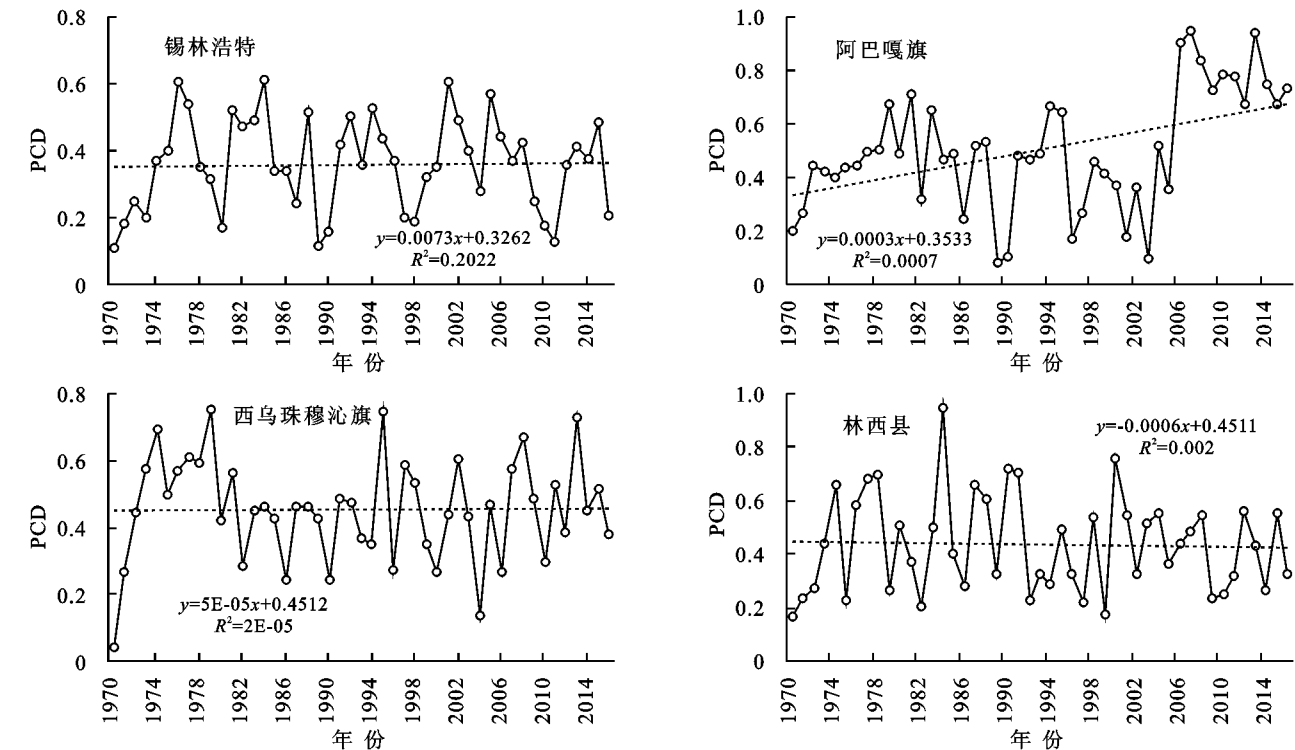


图 1 锡林河流域各站点集中度逐年变化

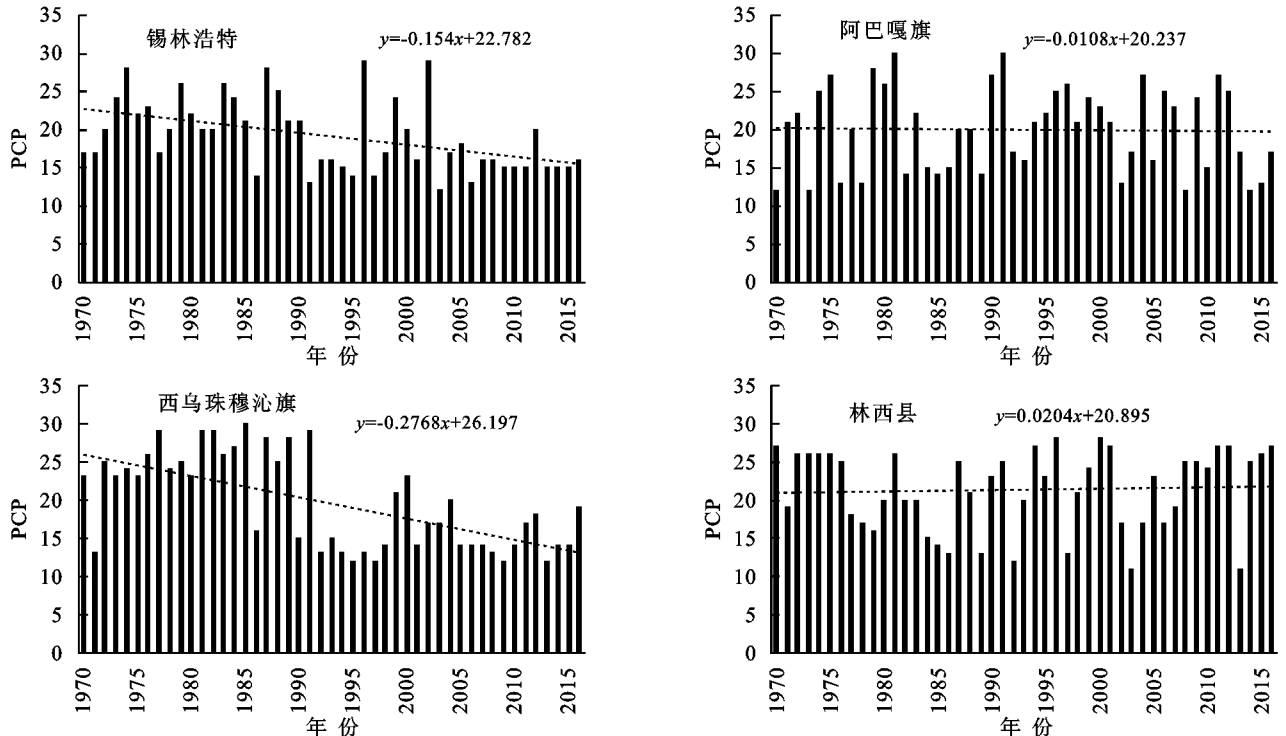


图 2 锡林河流域各站点集中期逐年变化

2.2 降雪集中度、集中期的周期变化

利用 Morlet 小波分析法对锡林河流域各站点的降雪集中度、集中期变化作周期分析,结果如图 3—4 所示。从锡林浩特站集中度的小波实部时频图可以看出,不同时段每个周期年降雪集中度的能量强弱分布,降雪集中度在 47 a 的时间尺度上发生了 3 次震荡,分别为 5~15 a, 20~35 a, 40~47 a。随着时间尺度的缩小,降雪集中度的变化周期稳定性也在减小,其中 20~35 a 的震荡最为明显,能量分布最为集中,为主要震荡周期区间,在该尺度上将降雪经历了集中—不集中—集中的交替变化。小波方差图反映降雪集中度波动变化随不同尺度的聚集程度,小波方差出现极值的时间尺度为降雪集中度的变化周期,方差值越大周期性越显著,最大值为第一主周期。所以结合锡林浩特站小波方差图可知,3 个主要震荡周期分别为,26 a, 42 a, 8 a。其中 26 a 为第一主周期,42 a, 8 a 分别为第二、三主周期。

阿巴嘎旗的小波实部时频图中反映出该站降雪集中度存在 5~12 a, 15~30 a, 35~45 a 尺度的周期变化,在主要震荡周期区间 15~30 a 的尺度上同样经历了集中—不集中—集中的交替变化。根据小波方差图,确定出 25 a 为第一主周期,11 a 为第二主周期,41 a 为第三主周期。西乌珠穆沁旗站降雪集中度存在 7 a, 25 a, 41 a 的主要周期变化特征,其中 25 a 的周期变化最为明显。林西县站有 12 a, 26 a, 41 a 的主周期变化规律,其中尺度为 26 a 的周期变化更为显著。西乌珠穆沁旗与林西县站同锡林浩特和阿

巴嘎旗相似,在主要震荡周期区间降雪存在集中—不集中—集中的交替变化规律。

降雪集中期的年际周期变化规律可从图 4 中看出,在锡林浩特站降雪集中期存在着 5~15 a, 20~30 a, 40~45 a 3 个尺度的准周期变化,其中尺度为 20~30 a 的周期变化最为显著,从小波方差图中可以得到在 20~30 a 尺度周期变化中,尺度中心为 24 a,所以 24 a 为第一主周期,11 a, 44 a 分别为第二第三主周期。阿巴嘎旗站有 3~10 a, 15~20 a, 25~35 a, 40~45 a 尺度上的周期变化,25~35 a 尺度上的周期变化在图中反映最为突出,结合小波方差图可得,在该尺度内的 24 a 为第一主周期,3~10 a 尺度内的 7 a 为第二主周期,在 25~35 a 尺度内的 34 a 为第三主周期。西乌珠穆沁旗的周期变化在 5~15 a, 20~30 a, 35~45 a 尺度上变化显著,20~30 a 尺度内的 24 a 在小波方差图中为最大值,所以 24 a 为西乌珠穆沁旗降雪集中期变化的第一主周期,11 a, 41 a 为第二、三主周期。林西县站有 7~18 a, 20~30 a, 35~45 a 尺度上的周期变化,其中 24 a 的周期性最显著。4 个站点在小尺度上集中期变化最为频繁,锡林浩特与西乌珠穆沁旗站分别在各自的 11 a 尺度上集中期经历了早—晚—早—晚—早—晚—早的多次更迭变化,阿巴嘎旗在 7 a 的尺度上林西县站在 16 a 的尺度上存在着早—晚—早—晚—早的变化。而各站在第一主周期尺度的变化都是早—晚—早,1985 年以前集中期偏早,1985—2000 年左右集中期进入偏晚期,2000 年以后再次进入偏早期,且至 2016 年各站偏早期尚未结束,按上述周期变化规律,集中期偏早将会持续。

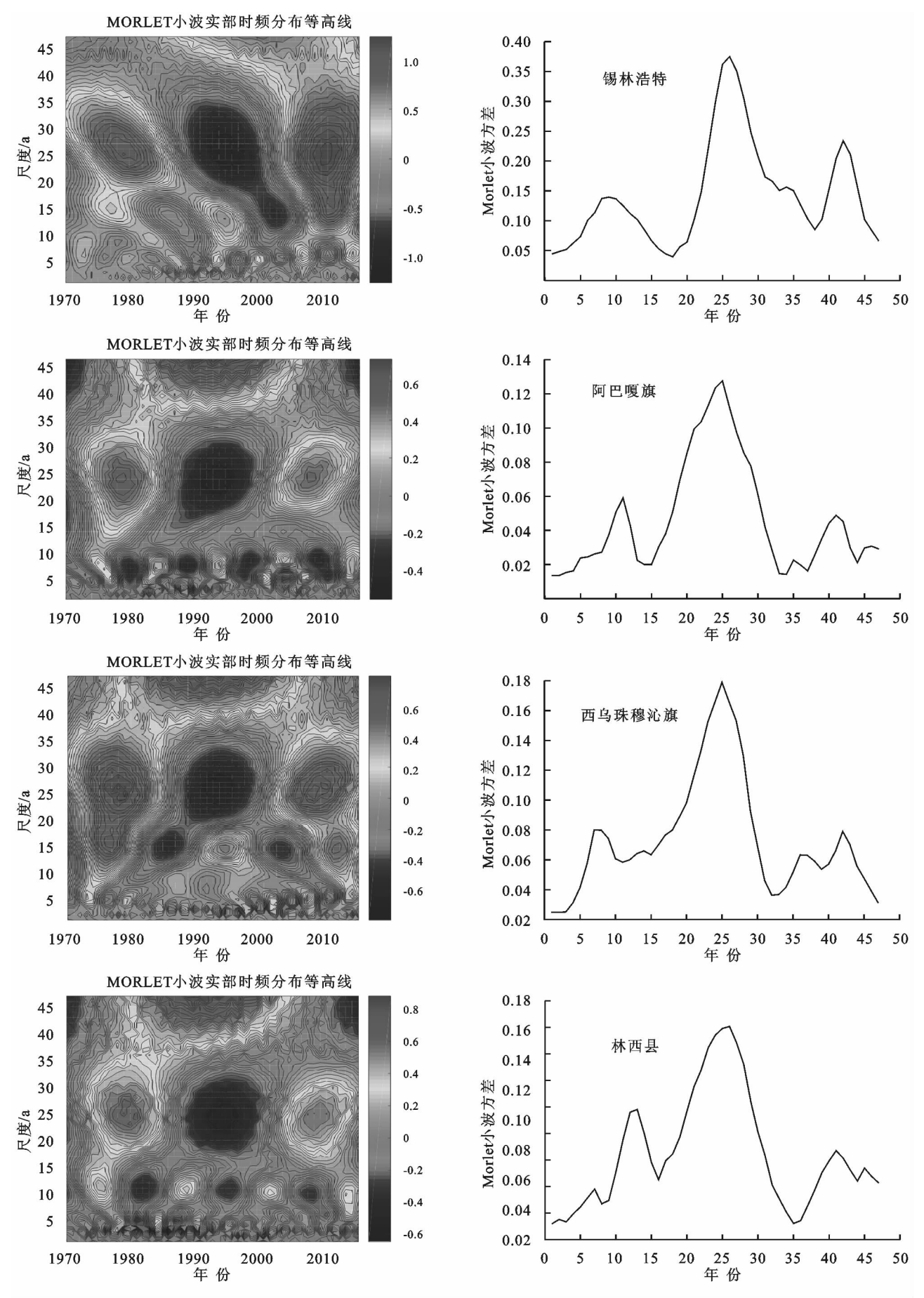


图 3 锡林河流域各站点集中度小波分析

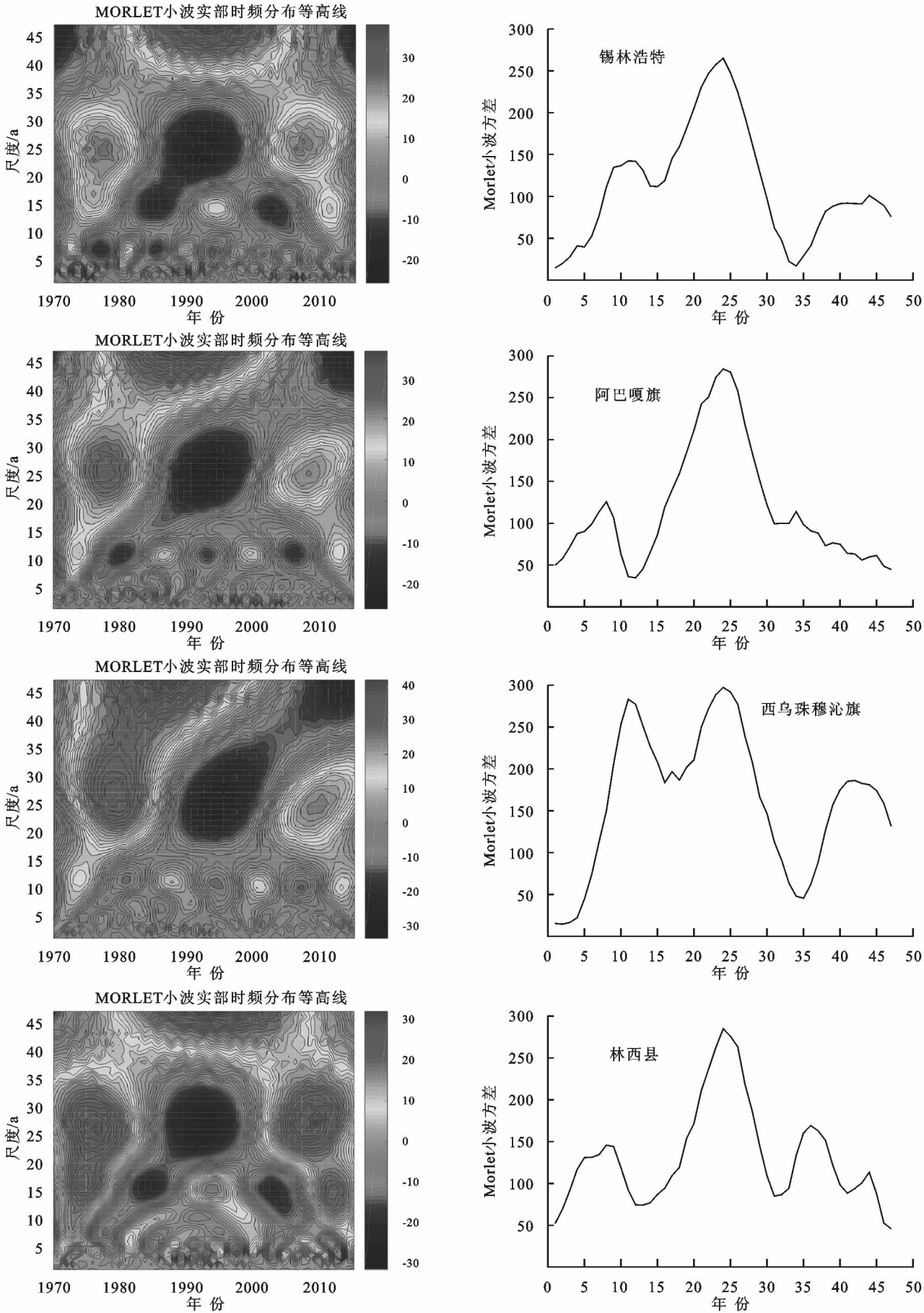


图 4 锡林河流域各站点集中期小波分析

2.3 集中度与集中期的 Mann-Kendall 突变分析

锡林河流域各站点集中度、集中期 Mann-Kendall 突变检验见图 5,见图所示和在置信区间内相交点为有效交点,即为时间序列(1970—2016 年)的突变点。锡林浩特站在置信区间内相交点仅有 2003 年一个有效交点,因此可知近 47 a 锡林浩特站集中度变化的突变点为 2003 年,同理集中期的和的有效交点在 1989 年,所以其突变点为

1998 年。阿巴嘎旗站集中度的和 UB_K 有 2008 年与 2011 年两个有效交点,故其集中度变化的可能突变点分别为 2008 年和 2011 年。阿巴嘎旗站集中期变化的突变点仅有一个点为 2012 年。西乌珠穆沁旗站的集中期、集中度在研究时间序列上都只有一个突变点,分别为 1983 年、1993 年。林西县降雪集中度变化存在着 2003 年与 2010 年两个突变点,而集中期仅有 2010 年一个突变点。

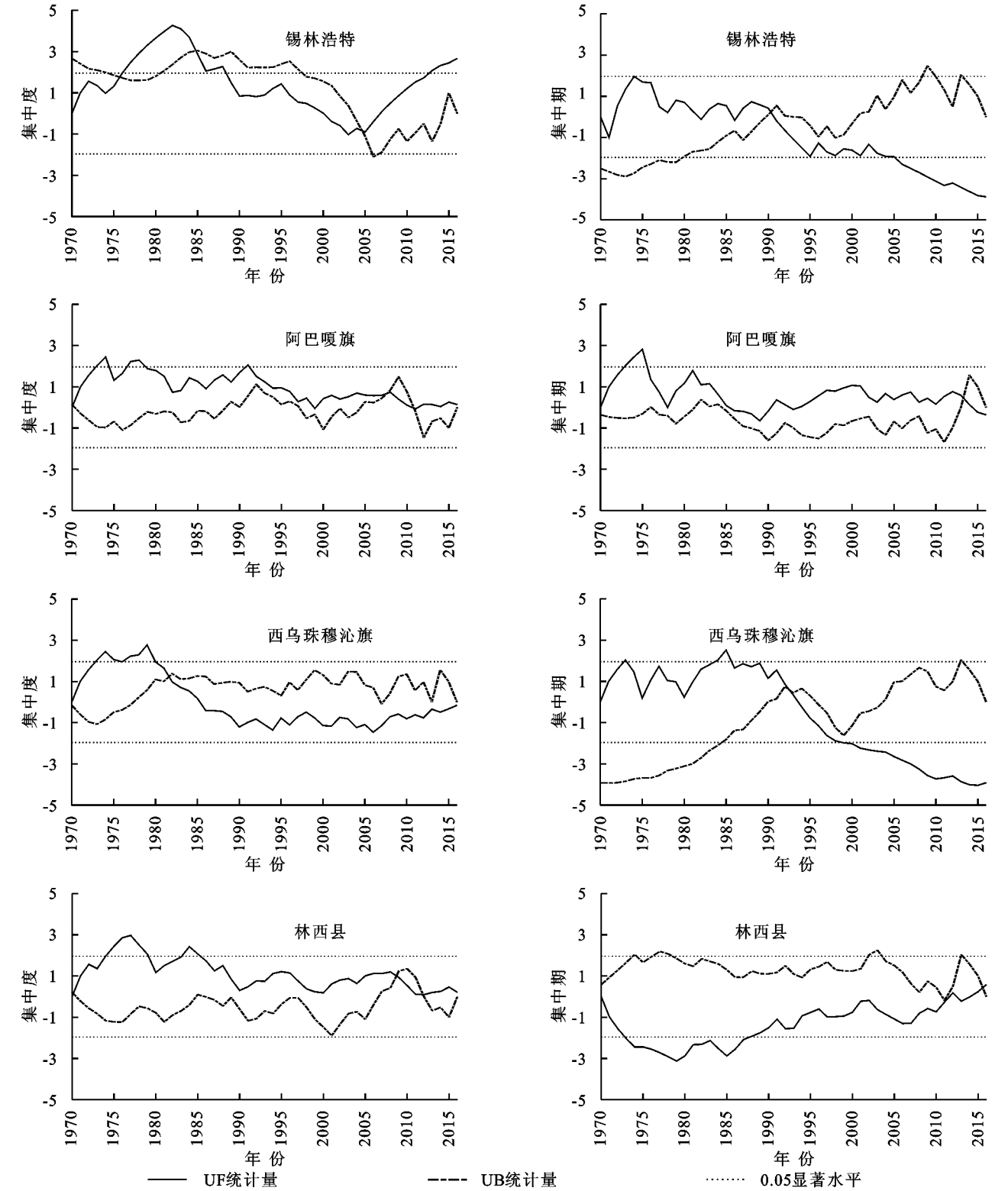


图 5 锡林河流域各站点集中度、集中期 Mann-Kendall 突变检验

整体来看降雪集中度突变点多集中于 2000 年以后,说明锡林河流域在 2000 年以后降雪产生突变,这可能是因为 21 世纪以来极端降雪天气频出,导致计算的降雪集中度、集中期产生突变。这也与郝祥云等在近 50 a 锡林河流域极端天气事件及其与气候变化的联系的研究结果相似^[25]。

2.4 集中度的 R/S 分析

采用 R/S 法分析锡林河流域各站点降雪期降雪集中度的 H 指数,结果如图 6 所示,从图中可以看出流域各站点的降雪期降雪集中度的 Hurst Line 线最大值不会超过 0.5,故各站点的集中度序列不具有长期的相关性,其未来降雪集中度的变化与过去的变化趋势相悖。其中锡林浩特站的 H 指数最大为 0.471 5,林西县为 0.308 0,阿巴嘎旗的 H 指数为 0.215 8,西乌

珠穆沁旗站 H 指数最小为 0.096 1。根据上文研究已知锡林浩特站与阿巴嘎旗站的降雪集中度变化趋势呈增长趋势,而西乌珠穆沁旗与林西县站呈下降趋势,结合 H 指数的意义可知,未来年锡林浩特站与阿巴嘎旗站点的降雪期降雪集中度变化是呈下降趋势的,降雪会越来越不集中,西乌珠穆沁旗站与林西站未来年集中度的变化是呈增长趋势,降雪的发生将更为集中。

H 指数在小于 0.5 的情况下,越接近于 0 反持续性越强,所以西乌珠穆沁旗站的降雪集中度将在未来年增长的更加显著。同理集中度在将来变化呈下降趋势的两个站点中,阿巴嘎旗站集中度的 H 指数远小于锡林浩特站,反持续性较强,所以降雪集中度在未来年增长趋势也会更加明显。

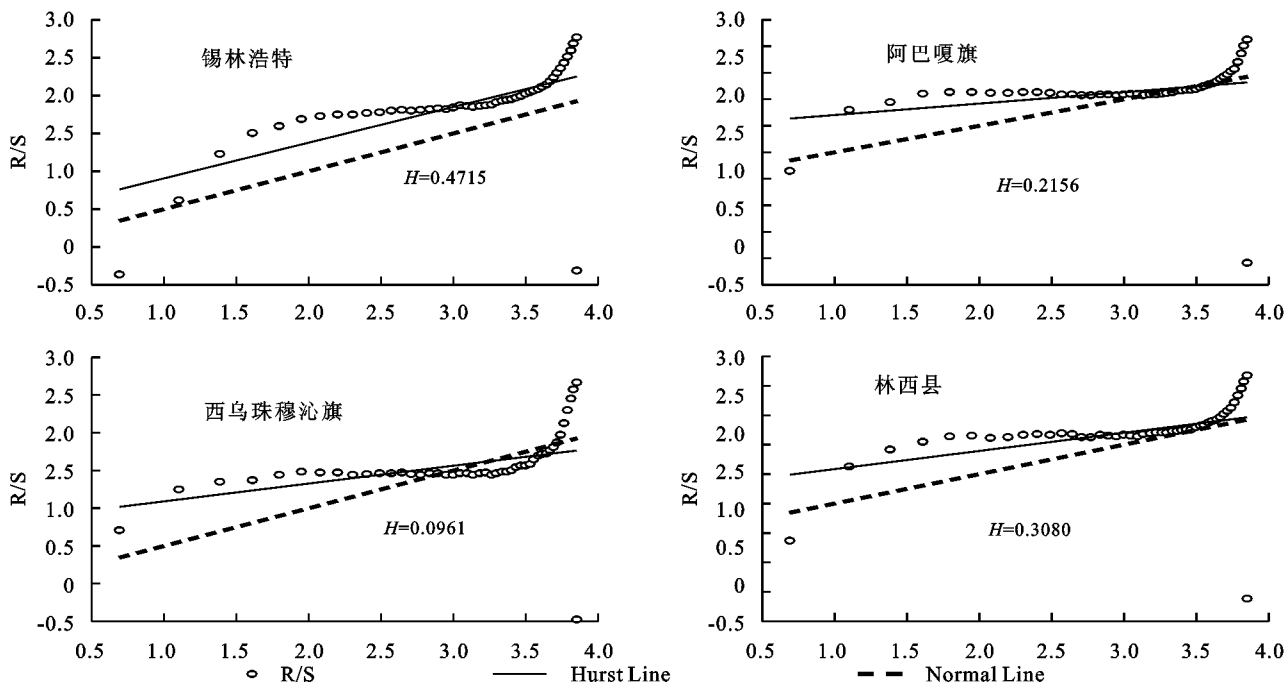


图 6 锡林河流域各站点集中度 R/S 分析

3 结论

(1) 在研究时间序列内,锡林河流域 1970 年降雪最不集中,流域各站点降雪集中度的均值反映出,锡林浩特站降雪最为集中,阿巴嘎旗站降雪最不集中,而就降雪集中年占比而言锡林浩特与林西站降雪集中年较多且占比一致。观察降雪集中度量值大小与趋势变化结合站点位置发现,锡林河流域南部降雪期降雪较北部更加集中,集中度呈现东增西减的趋势。

(2) 流域各站点除林西县站外降雪存在一个共同的集中期为 12 月上旬,林西县站的降雪集中 2 月,其集中期以 0.02 候/年的速度向后推迟,锡林浩特、阿巴嘎旗、西乌珠穆沁旗站降雪集中期分别以 0.154

候/年、0.010 8 候/年、0.277 候/年的速度提前。全流域降雪集中期偏早年较多。

(3) 锡林河流域各站点的降雪集中度周期变化的第一主周期都在 25 a 左右,所以可知流域的降雪集中度存在着 25 a 左右的明显的周期变化,且在主震荡周期区间降雪经历了集中—不集中—集中的交替变化,集中期有以 24 a 为主周期的显著周期变化,在主周期内集中期经历了多次早晚交替变化,且在研究时间序列内变晚的偏晚期尚未结束,按其集中期周期变化规律,2016 年以后集中期还会偏早。流域各站点降雪集中度经 M-K 突变检验,表明锡林河流域降雪集中度变化突变点多集中 2000 年以后。

(4) 流域各站点 H 指数均小于 0.5,集中度系列

变化具有反持续性。锡林浩特与阿巴嘎旗站降雪期的降雪集中度在未来年会呈现下降将趋势,阿巴嘎旗站的下降程度较明显,而西乌珠穆沁旗与林西县站的未来年集中度会表现为增长趋势,其中西乌珠穆沁旗站的增长趋势更加显著。

本文的研究仅限于对锡林河流域的降雪集中期、集中度进行研究,缺少对降雪天气的形成原因的研究,另外气候变化的原因很复杂,所以不管是降雪集中度还是集中期突变的产生原因都很复杂,需要更加深入的研究。由于研究区国家气象站点较少,站点分布又较为分散,导致站点数据代表性有限,所以本文没有在空间上的变化进行研究,今后可自主加密流域站点对流域降雪的各类特征在时空上进行更加详尽分析研究。

参考文献:

- [1] Mudelsee M, Btirngel M, Tetzlaff G, et al. No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe[J]. *Nature*, 2003,425(6954):166-169.
- [2] Esteban P, Jones P D, Martin-Vide J, et al. Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra, Pyrenees[J]. *International Journal of Climatology*, 2005,25(3):319-329.
- [3] 陈家其. 近二千年中国重大气象灾害气候变化背景初步分析[J]. *自然灾害学报*, 1996(2):18-27.
- [4] 李效收, 张明军, 汪宝龙, 等. 天山地区冬季降雪量及其集中度和集中期的变化特征[J]. *资源科学*, 2012, 34(8):1556-1564.
- [5] 周陆生, 李海红, 汪青春. 青藏高原东部牧区大: 暴雪过程及雪灾分布的基本特征[J]. *高原气象*, 2000, 19(4): 450-458.
- [6] 杨莲梅, 杨涛, 贾丽红, 等. 新疆大: 暴雪气候特征及其水汽分析[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(3):389-396.
- [7] 赵俊荣, 郭金强. 天山北坡中部一次罕见特大暴雪天气成因[J]. *干旱气象*, 2010, 28(4):438-442.
- [8] 江毅, 钱维宏. 内蒙古大(暴)雪的区域特征[J]. *地理学报*, 2003, 58(1):38-48.
- [9] 宫德吉, 李彰俊. 内蒙古大(暴)雪与白灾的气候学特征[J]. *气象*, 2000, 26(12):24-28.
- [10] 郝祥云, 朱仲元, 张圣微, 等. 近 35 a 锡林河流域积雪变化及其对气候的响应[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(2): 444-450.
- [11] 郝祥云, 朱仲元, 宋海清, 等. 锡林河流域积雪时空特征及其对径流的影响[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(6): 360-365.
- [12] 段超宇, 司建宁. 基于 SWAT 模型的寒旱区积雪与融雪期径流模拟应用研究: 以锡林河流域上游为例[J]. *中国农村水利水电*, 2017, 29(2):94-97.
- [13] 王冀, 赵春雨, 娄德君. 东北地区冬季降雪的集中度和集中期变化特征[J]. *地理学报*, 2010, 65(9):1069-1078.
- [14] Zhang L J, Qian Y F. Annual distribution features of theyearlly precipitation in China and their interannual variations[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 17(2):146-163.
- [15] 杨远东. 河川径流年内分配的计算方法[J]. *地理学报*, 1984, 39(2):218-227.
- [16] 白松竹, 陈真, 庄晓翠, 等. 阿勒泰地区冬季降雪的集中度和集中期变化特征[J]. *干旱气象*, 2014, 32(1):99-107.
- [17] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. *水科学进展*, 2002, 13(4):515-520.
- [18] 夏库热, 塔依尔, 海米提·依米提, 等. 基于小波分析的开都河径流变化周期研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(1):142-146.
- [19] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 水文时间序列多时间尺度分析的小波变换法[J]. *工程科学与技术*, 2002, 34(6):14-17.
- [20] 李国栋, 田海峰, 彭剑峰, 等. 基于小波和 M-K 方法的商丘气温时间序列分析[J]. *气象与环境学报*, 2013, 29(3):78-84.
- [21] 管晓祥, 张建云, 鞠琴, 等. 多种方法在水文关键要素一致性检验中的比较[J]. *华北水利水电大学学报: 自然科学版*, 2018, 39(2):51-56.
- [22] 潘雅婧, 王仰麟, 彭建, 等. 基于小波与 R/S 方法的汉江中下游流域降水量时间序列分析[J]. *地理研究*, 2012, 31(5):811-820.
- [23] 冯利华, 吴樟荣. R/S 分析在大气降水丰枯变化趋势预测中的应用[J]. *系统管理学报*, 2001, 10(1):79-81.
- [24] 禹朴家, 徐海量, 刘世薇, 等. 阿克苏河年径流变化的非线性特征[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(8):1412-1422.
- [25] 郝祥云, 朱仲元, 宋小园, 等. 近 50 a 锡林河流域极端天气事件及其与气候变化的联系[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(7):114-120.