DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.03.14

黑河流域1967-2009年气象干旱时空变化特征

咎大为
(甘肃省水文水资源局, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 以标准化降水蒸散指数(SPEI)反映气象干旱,基于黑河流域内外19个气象站1967-2009年月气象数据,计算季节尺度SPEI序列,利用M-K趋势检验、小波分析、反距离权重(IDW)插值等方法分析黑河流域春、夏、秋、冬四季43年间干旱变化趋势、周期特征以及干旱频率的空间分布特征。结果表明:中、上游干旱指数呈增大趋势,即旱情有所减缓,而下游干旱指数呈减小趋势,即干旱情况逐渐加重;无旱频率最大,且从上游到下游整体呈增加趋势;黑河流域干旱周期特征主要表现出16~22 a和32~33 a的年代际周期及2~5 a和6~11 a的年际周期特征;黑河流域四个季节轻中旱发生频率比重特旱发生频率大得多,且春、夏和秋季的轻中旱发生的高频区集中在中上游,冬季集中在下游,而四季的重旱和特旱发生高频区空间分布特征与轻旱和中旱正好相反。研究结果可为黑河流域水资源合理开发利用和科学抗旱提供理论依据。

关键词: 气象干旱; 标准化降水蒸散指数; 干旱频率; 时空分布; 黑河流域
中图分类号:S423 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2019)03-0092-08

Spatial-temporal variation characteristics of meteorological drought during 1967-2009 in the Heihe River Basin

ZAN Dawei
(*Gansu Province Hydrology and Water Resources Bureau, Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract: Using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) to reflect the meteorological drought, and based on the monthly meteorological data of 19 weather stations both inside and outside of Heihe River Basin (HHRB) in 1967-2009, this study calculated the season scale SPEI sequence and analyzed the drought trend, cycling characteristics, and drought frequency spatial distribution characteristics of four seasons during the 43 years using the M-K trend test, wavelet analysis, and inverse distance weighting (IDW) interpolation method. The results showed that: the SPEI showed increasing trend in the upper and middle reaches, whereas expressed decreasing trend in lower reaches. The frequency of drought-free occurrence was the highest, and the frequency decreased from the upstream to downstream. The drought of HHRB had 16-22 and 32-33 years inter-decadal oscillation period and 2-5 and 6-11 years inter-annual oscillation period. The frequency of light and moderate drought in four seasons of HHRB was much greater than that of sever and extreme drought, the high frequency regions of spring, summer and autumn drought were situated in the middle-upper reaches, while that was concentrated in downstream in winter. And the spatial distribution of sever and extreme drought with high frequency was contrary to the light and moderate drought. This study can provide theoretical basis for rational development and utilization of water resources and scientific drought resistance in HHRB.

Key words: meteorological drought; standardized precipitation evapotranspiration index(SPEI); drought frequency; spatial and temporal distribution characteristics; Heihe River Basin

收稿日期:2018-12-26; **修回日期**:2019-03-06
作者简介:咎大为(1982-),男,辽宁锦县人,本科,高级工程师,研究方向为水文水资源等。

1　研究背景

IPCC 于 2007 年发布的第四次评估报告表明[1],干旱在全球的影响范围将更加广泛,已经成为世界各国共同关注的焦点,在气候变化和社会经济迅猛发展的背景下,水资源短缺问题会更加严重,干旱发生概率也呈逐渐增加趋势。目前国内外干旱研究中常用的干旱指数很多,如水分亏缺指数、标准化降水指数(*SPI*)[2]、帕默尔干旱指数(*PDSI*)[3]、标准化降水蒸散指数(*SPEI*)[4] 等。虽然,*SPI* 具有计算简便、空间可比性等优点,但忽略了气温和蒸发量对干旱发生的影响,在气候变暖条件下研究干旱问题具有局限性[5],*PDSI* 在综合考虑降水量、潜在蒸散量等因素基础上进行计算,但存在时间尺度单一、不具有空间可比性等缺点[6]。而 *SPEI* 同时考虑降水和温度因素,融合了 *PDSI* 和 *SPI* 的优点,考虑温度对干旱的影响并能够表现干旱的多尺度特性,有助于准确识别干旱特性[7]。Yang 等[8] 利用 *SPEI* 研究海河流域干旱时空分布特征,结果表明 *SPEI* 在气候变化的背景下可以较好地进行干旱监测;赵平伟等[9] 在滇西南地区干旱演变研究中对 *SPEI* 和 *SPI* 的应用效果进行了对比,结果显示 *SPEI* 对气候变化背景下的区域干旱监测效果较为理想。

钟锋等[10]利用参考作物蒸散量(ET_0) 与降水量(P) 的比值表示干旱指数(AI 指数)对黑河流域干旱的时空变化特征进行了分析,结果表明黑河流域干旱表现出明显的南北差异。此外,黑河流域受到多种气候影响,该地区气温、降水在时间上表现出显著的季节特征,有必要对该地区不同季节干旱演变特征进行详细分析。因此,本研究利用 *SPEI* 指数定量表征干旱,基于 M – K 趋势检验、小波分析及 GIS 技术分析黑河流域近 43 年春、夏、秋、冬四季干旱时间变化趋势、周期特征以及干旱频率空间分布特征,全面分析气候变化下黑河流域干旱时空变化特征,为流域水资源合理开发利用和科学抗旱提供理论依据。

2　材料与方法

2.1　研究区概况

黑河流域是我国西北地区第二大内陆河,位于河西走廊中部,地处欧亚大陆中心,流域范围介于 97°50′ ~ 102°00′E、37°50′ ~ 42°40′N,涉及青海、甘肃和内蒙古三省。黑河干流发源于祁连山中段北麓,全长 821 km,流域面积约 14.29×10^4 km^2。出山口莺落峡以上为上游,是主要产流区,河道长 303 km,气候阴湿寒冷,年降水量 350 mm;莺落峡至正义峡为中游,流程 185 km,地势平坦,光热资源充足,但干旱严重,年降水量 140 mm,而多年平均气温在 6 ~ 8℃,年蒸发能力达到 1 410 mm;正义峡以下为下游。气候主要受西风带环流以及极地冷气团影响。降水稀少,蒸发强烈。年降水量仅有 47 mm,多年平均气温在 8 ~ 10℃,年蒸发量达到 2 250 mm,气候非常干燥,且太阳辐射强烈。研究区概况见图 1。

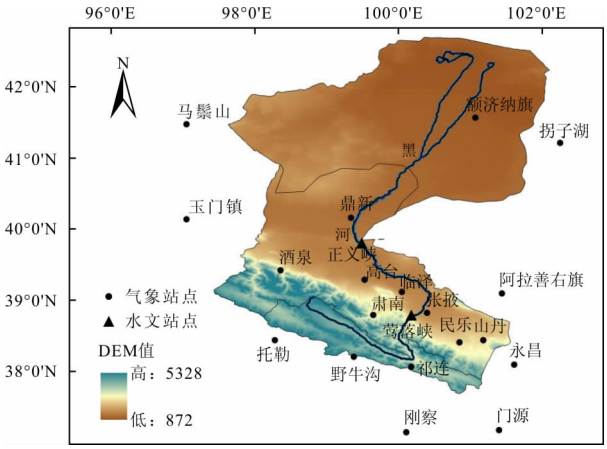


图 1　黑河流域位置及站点分布图

2.2　数据资料

本研究利用黑河流域内 11 个和流域外 8 个气象站点(图 1)的月降水量、平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、风速和日照时数等资料计算 *SPEI*,其中民乐、临泽、肃南、门源 4 个气象站点数据来自甘肃省气象局,其余 15 个气象站数据来自中国气象科学数据共享服务网(http://data.cma.cn/data/),资料时间序列为 1967 – 2009 共 43 a。为保证结果的可比性和可靠性,上、中、下游分别选择 2 个典型站进行干旱时间特征分析,选取 19 个站数据进行空间插值分析干旱空间分布特征。一年四季按照气象季节划分,即春季为 3 – 5 月,夏季为 6 – 8 月,秋季为 9 – 11 月,冬季为 12 月 – 次年 2 月。

2.3　研究方法

2.3.1　SPEI 指数　本研究选用标准化降水蒸散指数(*SPEI*) 研究气象干旱,*SPEI* 的原理是利用降水量与蒸散量之间的差异程度来代表区域干旱状况[11]。首先,计算降水量和潜在蒸发量之间的差值,然后对差值序列进行拟合求得累积概率密度函数,最后将其转化为标准正态分布求得 *SPEI* 值。其中,潜在蒸散量 *PET* 使用联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)

推荐的同时考虑了能量平衡和水汽扩散的 Penman – Monteith 公式计算[12]。具体计算步骤及干旱分级标准(表 1)见参考文献[13]。

表 1 标准化降水蒸散指数 *SPEI* 干旱等级划分

等级	干旱类型	*SPEI* 值
I	无旱	$-0.5 < SPEI$
II	轻旱	$-1.0 < SPEI \leqslant -0.5$
III	中旱	$-1.5 < SPEI \leqslant -1.0$
IV	重旱	$-2.0 < SPEI \leqslant -1.5$
V	特旱	$SPEI \leqslant -2.0$

2.3.2 Man – Kendall 检验法 M – K 检验法不要求样本服从特定的分布,也不受少数异常值干扰,且计算方法较为简单。目前,干旱研究中常采用M – K 检验法来分析研究区干旱变化趋势[14]。

在 M – K 趋势检验中,假定 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 为一组时间序列的变量,n 为该变量时间序列的样本个数,检验的统计量 S 按照下式计算:

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_k - x_j) \tag{1}$$

$$\operatorname{sgn}(x_k - x_j) = \begin{cases} 1 & (x_k - x_j > 0) \\ 0 & (x_k - x_j = 0) \\ -1 & (x_k - x_j < 0) \end{cases} \tag{2}$$

式中:S 为正态分布,均值为 0;x_j、x_k 分别为 j、k 年变量的实测值。

标准的正态分布统计量通过下式计算:

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & S < 0 \end{cases} \tag{3}$$

其中方差 Var 按下式计算:

$$\operatorname{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \tag{4}$$

在特定的 α 置信区间,若出现 $|Z| \geqslant Z_{1-\alpha/2}$,则拒绝原假设,即在 α 置信区间,时间序列上升或下降趋势显著。如统计量 Z 大于 0,则为上升趋势;反之,则呈现下降趋势。$|Z| \geqslant 1.28$(1.64、2.32) 时,则表示通过了信度 90%(95%、99%)的显著性检验。

2.3.3 小波分析 在判断各序列的主要周期时,本文采用小波方差检验,计算公式如下:

$$W_f(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a,b)|^2 \, \mathrm{d}b \tag{5}$$

式中:$W_f(a)$ 为小波方差;a 为尺度因子;b 为平移因子;$W_f(a,b)$ 为小波系数。

根据小波方差图中峰值处对应的尺度来确定该序列的主要时间尺度,即主周期[15]。

2.3.4 干旱频率 干旱频率用来表示研究区内干旱发生的频繁程度,即研究时段内发生干旱的年数占总年数的百分比[16]。

$$P = \frac{n}{N} \times 100\% \tag{6}$$

式中:P 为干旱频率;n 为研究时段发生干旱的年数;N 为 研究时段总年数。

3 结果与分析

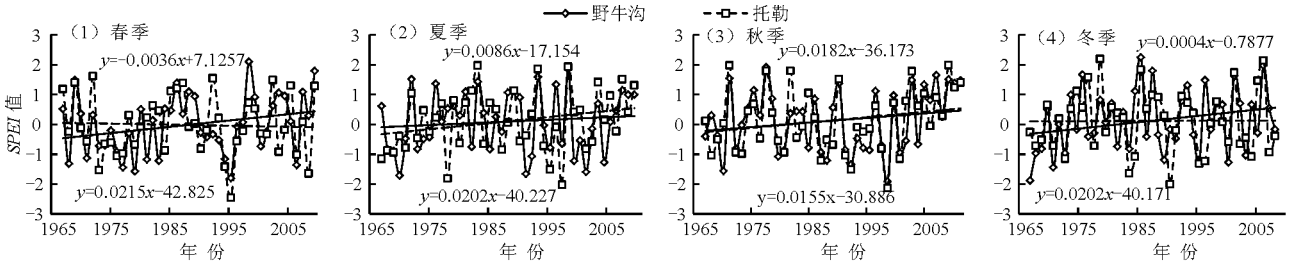
3.1 气象干旱时间特征

3.1.1 季节变化特征 *SPEI* 具有多时间尺度特征,本文以 3 个月时间尺度为例,讨论 *SPEI* 季节变化特征。由于黑河流域气象站点分布不均,故上、中、下游各选取 2 个代表站点进行分析。上游选取野牛沟和托勒站,中游选取张掖和高台站,下游选取鼎新和额济纳旗站。1967 – 2009 年各代表站四季 *SPEI* 值逐年变化情况如图 2 所示。

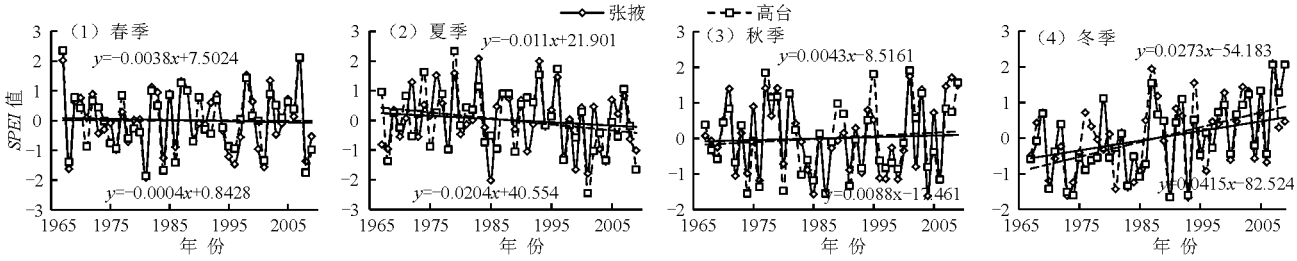
从图 2 可以看出,中下游张掖、高台、鼎新和额济纳旗 4 个气象站 *SPEI* 序列的变化倾向率在春季分别为 –0.038/10a、–0.004/10a、–0.177/10a 和 –0.031/10a,夏季分别为 –0.110/10a、–0.204/10a、–0.136/10a 和 –0.236/10a,秋季分别为0.043/10a、0.088/10a、–0.030/10a 和 –0.109/10a,冬季分别为 0.273/10a、0.415/10a、0.096/10a 和 0.352/10a。同时,上中游 4 站 *SPEI* 序列的振荡趋势均是在春季保持较高的一致性,而下游 2 站 *SPEI* 序列的振荡趋势则是在秋季较为接近。

黑河流域代表站 *SPEI* 序列的 M – K 趋势检验结果(表 2)表明,*SPEI* 序列在野牛沟站的春、秋、冬季,托勒站的夏秋季,张掖站、高台站和额济纳旗站的冬季均呈现上升趋势,且通过显著性检验,即干旱呈现显著下降趋势;而在高台站和额济纳旗站的夏季以及鼎新站的春季呈现出显著下降趋势,即干旱呈现显著增加趋势。整体上看,M – K 趋势检验结果与倾向率结果基本保持一致,中、上游干旱指数呈增大趋势,而下游干旱指数呈减小趋势,即中、上游旱情在减缓,下游干旱情况在加重。

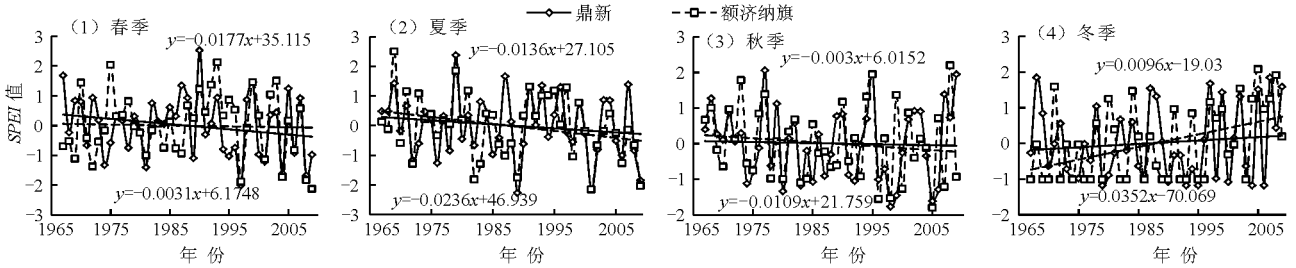
3.1.2 年代际变化特征 以 20 世纪 70s、80s、90s 以及 21c00s 分别表示 1970 – 1979 年、1980 – 1989 年、1990 – 1999 年、2000 – 2009 年 4 个年代际,进而研究干旱年代际变化特征。黑河流域代表性站点不同季节的干旱频率特征如图 3 所示。



(a) 黑河上游(野牛沟、托勒气象站)



(b) 黑河中游(张掖、高台气象站)



(c) 黑河下游(鼎新、额济纳旗气象站)

图 2　1967 – 2009 年黑河上游(野牛沟、托勒)、中游(张掖、高台)和下游(鼎新、额济纳旗) *SPEI* 四季逐年变化过程

表 2　各代表站点不同季节 *SPEI* 序列趋势 M – K 检验统计量 *Z* 值

季节	野牛沟	托勒	张掖	高台	鼎新	额济纳旗
春季	1.601*	– 0.115	– 0.387	0.052	– 1.308*	0.534
夏季	0.848	1.852**	– 0.597	– 1.476*	– 0.952	– 1.622*
秋季	1.350*	1.664**	0.094	0.597	– 0.429	– 1.015
冬季	1.538*	– 0.052	1.999**	3.600***	0.220	2.648***

注:*、** 和 *** 分别表示检验结果通过 90%、95% 和 99% 的显著性检验。

春季,上游从 70s 到 21c00s,干旱发生频率呈现减小 – 增大 – 减小的趋势。中游 70s 到 80s,张掖站干旱发生频率增大,而高台站无旱频率没有变化,但轻旱发生频率减小,有部分转化为了中旱和重旱,说明中游在此阶段干旱程度加重;80s 到 90s,中游干旱发生频率均减小,且没有中旱发生,而 90s 到 21c00s 干旱频率变化特征与 70s 到 80s 保持一致。下游鼎新站从 70s 到 21c00s,干旱发生频率呈现增大 – 减小 – 增大的趋势,而额济纳旗站干旱频率变化特征与鼎新站正好相反。

夏季,70s 到 80s,上游野牛沟站干旱发生频率减小,托勒站无旱频率没有变化,但轻旱发生频率增加;80s 到 90s,上游干旱发生频率增加,且野牛沟站的中旱、重旱发生频率和托勒站的重旱、特旱发生频率均增大;90s 到 21c00s,干旱发生频率均减小。从 70s 到 80s,中游张掖站干旱发生频率减小,但有特旱发生;80s 到 90s,干旱发生频率增加,而高台站在这 2 个时段内干旱发生频率特征与张掖站相反;90s 和 21c00s,两站的干旱发生频率变化特征呈增加趋势。下游 2 站的干旱频率特征与春季变化情况相似,70s 到 80s,鼎新站干旱发生频率减小,但有特旱发生,而额济纳旗站干旱发生频率增加且有重旱发生;80s 到 21c00s,两站干旱发生频率均呈先降低再增加的趋势。

秋季,70s到21c00s,上游和中游4站的干旱发生频率变化特征整体上一致,均呈现出增加-增加-减小的趋势,其中,70s到80s,野牛沟站中旱发生频率增大,托勒站轻旱发生频率增幅较大,张掖站有重旱发生,高台站中旱发生频繁;80s到90s,野牛沟站轻旱发生频率大幅增加,托勒站有重旱和特旱发生;在21c00s,托勒站没有发生干旱。下游鼎新站和额济纳旗站,70s到80s的干旱发生频率均增加,80s鼎新站以中旱为主,而额济纳旗站以轻旱为主;80s到90s,鼎新站干旱发生频率增加,而额济纳旗站减小但有重旱发生;90s到21c00s,鼎新站干旱发生频率开始减小,而额济纳旗开始增加且重旱时有发生。

冬季,70s到21c00s,上游2站干旱发生频率相对较低且整体上保持相对稳定,其中野牛沟站90s的干旱发生频率比其他3个年代稍高,托勒站在21c00s呈现出相对较高的轻旱频率。中游张掖站在4个年代的干旱发生频率相对稳定,而高台站干旱发生频率呈现持续减小趋势,特别是在21c00s没有干旱发生。70s到80s,下游2站干旱发生频率均呈减小趋势;80s到和90s,鼎新站干旱发生频率增加,额济纳旗站干旱发生频率基本不变,但中旱发生频率有所增大;而90s到21c00s,两站的干旱发生频率均呈现减小趋势。

3.1.3 周期特征 利用小波函数对黑河流域6个代表站四季的*SPEI*序列进行多时间尺度周期分析,由于篇幅有限,以野牛沟站为例进行详细分析。野牛沟站*SPEI*序列四季小波方差图见图4。

分析图4可知,在春季有3个比较明显的主峰,分别对应着20、16、6 a的周期,说明这3个主周期控制着春季*SPEI*指数在时域内的变化特征。同理,夏季有32、5、2 a的主周期,秋季有32、3、6 a的主周期,冬季有3、5、11 a的主周期。

根据各气象站*SPEI*序列小波周期分析结果,流域上、中、下游6个代表气象站*SPEI*的主周期列于表3。第1主周期到第3主周期在*SPEI*序列中所起的作用逐渐减弱。

黑河流域*SPEI*序列的周期特征主要表现出16~22和32~33 a的年代际振荡周期及2~5和6~11 a的年际振荡周期,各周期的主次顺序因气象站而异,且同一个气象站在四季的周期特征也有所差别。其中,黑河流域上游主要存在32~33 a的长周期和16 a左右的中周期以及3年左右的短周期,中游以16~20 a中周期和4 a左右的短周期为主,下游主要以33 a的长周期和21 a的中周期以及4 a左右的短周期为主。

表3 黑河流域6个气象站*SPEI*序列的主周期分析 a

季节	气象站点	主周期			季节	气象站点	主周期		
		一	二	三			一	二	三
春季	野牛沟	20	16	6	秋季	野牛沟	32	3	6
	托勒	16	6	3		托勒	33	6	21
	张掖	3	5	20		张掖	33	2	14
	高台	3	5	16		高台	7	11	2
	鼎新	3	21	17		鼎新	6	2	21
	额济纳旗	14	21	33		额济纳旗	5	2	21
夏季	野牛沟	32	5	2	冬季	野牛沟	3	5	11
	托勒	33	21	9		托勒	6	4	2
	张掖	4	3	6		张掖	10	5	4
	高台	16	3	33		高台	22	9	4
	鼎新	4	13	33		鼎新	5	10	21
	额济纳旗	21	6	2		额济纳旗	21	4	33

3.2 干旱频率空间分布特征

黑河流域四季气象干旱频率空间分布特征见图5。由图5可知,春季轻中旱发生频率在18.6%~34.9%之间,轻中旱的高频区集中在上游肃南、中游山丹以及下游鼎新地区,而祁连、民乐和酒泉轻中旱发生频率较低。

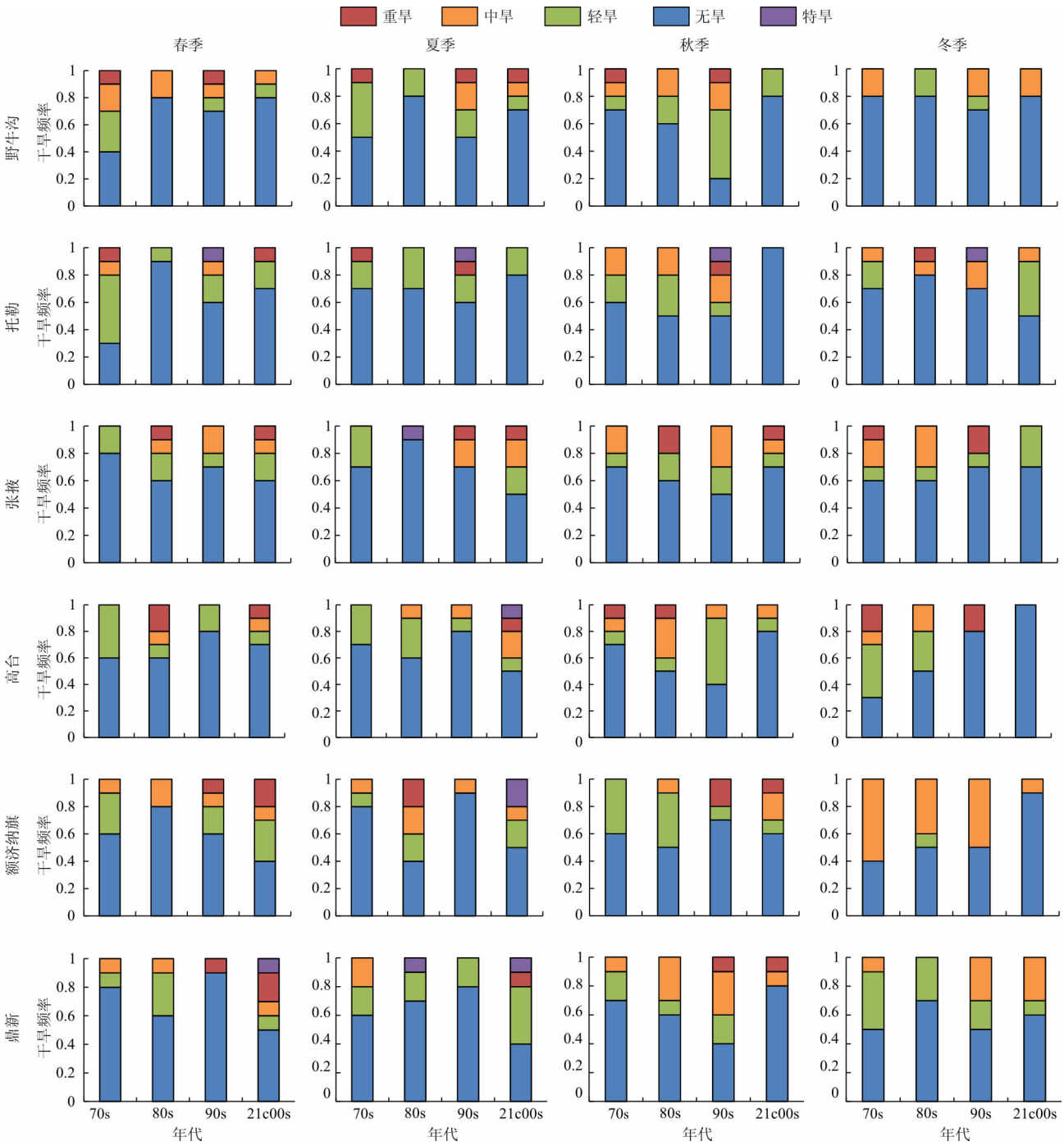


图 3　黑河流域各代表站点不同季节干旱发生频率年代际比较

重特旱发生的频率集中在 4.6% ~9.3% 之间，比轻中旱发生频率低很多，且主要分布在中游酒泉，从流域上游到下游呈现逐渐升高趋势。

夏季轻中旱发生频率在 18.6% ~32.5% 之间，除上游肃南、祁连和下游额济纳旗地区处于低频区，其余均处于高频区，即轻中旱发生的频率较高。重特旱发生频率较低，在 4.6% ~9.3% 之间，主要集中在下游额济纳旗地区。

秋季轻中旱发生频率在 26.8% ~41.8% 之间，上游的民乐、祁连和中游的张掖、山丹地区轻中旱发生频率较低，中上游其他区域轻中旱发生频率均较高，而下游大部分区域处于轻中旱发生的低频区。重特旱发生的频率在 0 ~7.0% 之间，其中中游酒泉地区重特旱发生频率接近 0。

冬季轻中旱发生频率在 20.9% ~44.2% 之间，重特旱发生频率集中在 0 ~9.3% 之间，两者的空间分布特征都很明显。轻中旱发生频率从上游到下游表现为依次升高，而重特旱集中在黑河流域的上游

和中游地区。

综上所述,黑河流域四个季节轻中旱发生频率都比重特旱发生的频率大得多,且春、夏和秋季的轻中旱发生高频区集中在中上游,冬季集中在下游;而四季的重特旱发生相对高频区空间分布特征与轻中旱正好相反。同时,秋季和冬季轻中旱发生频率比春季和夏季发生频率稍大,而四季的重特旱发生频率差别不大。

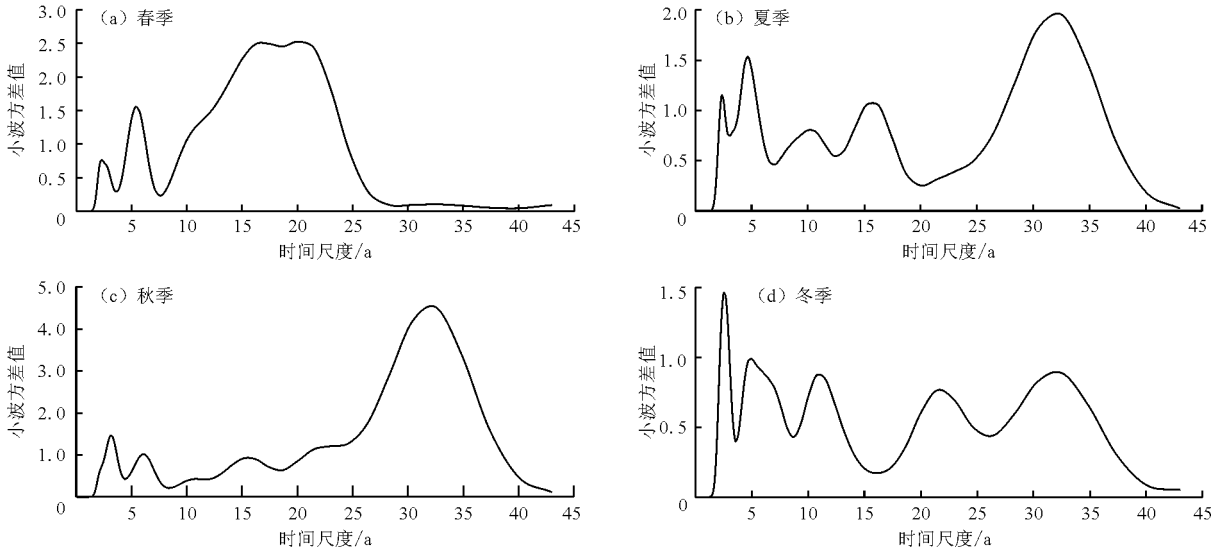


图 4 野牛沟站 *SPEI* 序列四季小波方差

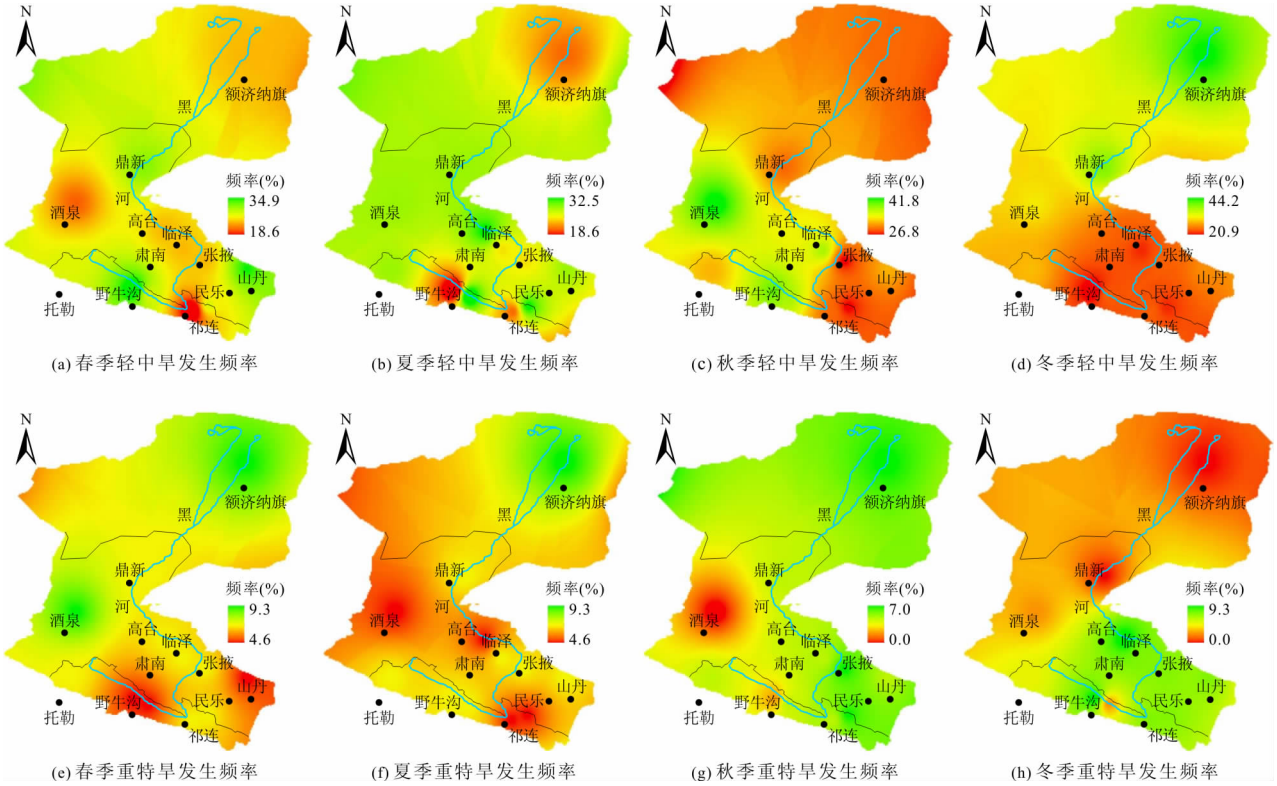


图 5 黑河流域四季气象干旱频率空间分布特征

4 结 论

本文基于黑河流域内外 19 个气象站 1967 – 2009 年共 43 a 月气象数据,计算了季节尺度的 *SPEI* 序列值,运用 M – K、小波分析、IDW 插值等方法重点分析了黑河流域春、夏、秋、冬四个季节气象干旱时间变化趋势、周期特征及干旱频率空间分布特征,得到以下主要结论:

(1) *SPEI* 序列在上游野牛沟站的春、秋、冬季,托勒站的夏季和秋季,中游张掖站、高台站和下游额济纳旗站的冬季均呈现上升趋势,且通过显著性检验,而在高台站和额济纳旗站的夏季以及鼎新站的春季呈现出显著下降趋势。整体上看,中、上游干旱指数呈增大趋势,即中、上游旱情在减缓,而下游干旱指数呈减小趋势,即下游干旱情况在加重。

(2)黑河流域无旱频率最大,且从上游到下游整体呈增加趋势。

(3)黑河流域 *SPEI* 序列的周期特征复杂,不同站点在不同季节的周期变化差异较大,主要存在 16 ~22 和 32 ~33 a 的年代际周期及 2 ~5 和 6 ~11 a 的年际周期特征。

(4)干旱频率空间分布上,黑河流域四个季节轻中旱发生的频率都比重特旱发生的频率大得多,且春、夏和秋季的轻中旱发生的高频区集中在中上游,冬季集中在下游;而四季的重特旱发生的高频区空间分布特征与轻中旱正好相反。同时,秋、冬季轻中旱发生频率比春、夏季发生频率稍大,而四季的重特旱发生频率差别不大。

参考文献:

[1] 张建云, 王国庆, 刘九夫, 等. 气候变化权威报告 – IPCC 报告[J]. 中国水利, 2008(2): 38 – 40.

[2] 鞠 彬, 曾 明, 徐国梁. 不同干旱指数在新疆哈巴河地区旱情评价中的应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2):237 – 243.

[3] WAMBUA R M, MUTUA B M, RAUDE J M. Analysis of spatial and temporal drought variability in a tropical river basin using Palmer Drought Severity Index (PDSI)[J]. International Journal of Water Resources and Environmental Engineering, 2017, 9(8): 178 – 190.

[4] 张丽艳,杨 东,马 露. 京津冀地区气象干旱特征及其成因分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(12):28 – 38.

[5] 杨 庆, 李明星, 郑子彦, 等. 7 种气象干旱指数的中国区域适应性[J]. 中国科学:地球科学, 2017, 47(3): 337 – 353.

[6] SHEN Xiaojing, WU Xu, XIE Xinmin, et al. Spatiotemporal analysis of drought characteristics in Song – Liao River Basin in China[J]. Advances in Meteorology, 2017:1 – 13.

[7] 王 林, 陈 文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2):423 – 431.

[8] YANG Meijian, YAN Denghua, YU Yingdong, et al. SPEI – based spatiotemporal analysis of drought in Haihe River Basin from 1961 to 2010[J]. Advances in Meteorology, 2016:1 – 10.

[9] 赵平伟, 郭 萍, 李立印, 等. SPEI 及 SPI 指数在滇西南地区干旱演变中的对比分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(1):142 – 149.

[10] 钟 锋, 粟晓玲, 郭 静. 黑河流域干旱指数的变化趋势及其多时间尺度特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017,45 (9):136 – 144.

[11] MING Bo, GUO Yinqiao, TAO Hongbin, et al. SPEIPM – based research on drought impact on maize yield in North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(4): 660 – 669.

[12] 张晓琳, 熊立华, 林 琳, 等. 五种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用[J]. 干旱区地理, 2012, 35(2):229 – 237.

[13] 高 瑞, 王 龙, 杨茂灵, 等. 基于 SPEI 的南盘江流域近 40 年冬春干旱时空特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3):67 – 70.

[14] 张子凡,姜 帅,李娇娇, 等. 基于 SPI 指数的惠州市干季干旱趋势分析[J]. 中国农学通报, 2018, 34(31): 135 – 139.

[15] 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(4): 503 – 509.

[16] 王明田, 王 翔, 黄晚华, 等. 基于相对湿润度指数的西南地区季节性干旱时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19):85 – 92 +295.