DOI: 10.5846/stxb201806151335

王晓利,张春艳,侯西勇.1961—2017 年环渤海地区气象干旱时空特征及致灾危险性评估.生态学报,2019,39(13): - . Wang X L, Zhang C Y, Hou X Y.Spatial-temporal characteristics and hazard risks of meteorological drought in Circum-Bohai-Sea region from 1961 to 2017. Acta Ecologica Sinica,2019,39(13): - .

1961—2017 年环渤海地区气象干旱时空特征及致灾危险性评估

王晓利^{1,2},张春艳^{1,2,3},侯西勇^{1,2,*}

1 中国科学院烟台海岸带研究所,烟台 264003
 2 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室,烟台 264003
 3 江西理工大学建筑与测绘工程学院,赣州 341000

摘要:基于 1961—2017 年环渤海地区 60 个地面气象站点的逐日气温和降水资料,计算了各站点逐日气象干旱综合指数 (Meteorological drought Composite Index, MCI),统计近 57 年各站点的气象干旱过程,并进一步分析了环渤海地区各季节气象干 旱的时空变化特征及致灾危险性等级分布。结果表明:(1)环渤海地区春季干旱覆盖范围和持续日数呈下降趋势,但干旱强度 有所增加,夏、秋两季干旱覆盖范围和持续日数呈上升趋势,而干旱强度有所减少,冬季干旱覆盖范围和干旱强度均呈增加状 态,干旱持续日数有所下降。(2)春季干旱覆盖范围、干旱持续日数、干旱强度以及干旱发生频率均居四季之首,干旱状况最严 重,夏、秋季次之,冬季最轻。(3)各季节干旱强度和干旱发生频率的高值区主要分布在辽宁西北部、河北中南部以及山东大部 分地区,低值区主要位于辽宁东部地区。(4)各季节干旱致灾危险性等级总体呈西高东低、南高北低的分布特征,其中,河北中 南部气象干旱的致灾危险性较高,辽宁东部的较低;春旱致灾危险性总体较高,夏、秋季次之,冬季最低。 关键词:气象干旱;MCI;致灾危险性;时空特征

Spatial-temporal characteristics and hazard risks of meteorological drought in Circum-Bohai-Sea region from 1961 to 2017

WANG Xiaoli^{1, 2}, ZHANG Chunyan^{1, 2, 3}, HOU Xiyong^{1, 2, *}

1 Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

2 Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

3 College of Architectural and Surveying& mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China

Abstract: On the basis of observed daily temperature and precipitation data from 60 meteorological stations in the Circum-Bohai-Sea region from 1961 to 2017, which were provided by the National Climate Centre, China Meteorological Administration, the daily meteorological drought composite index (MCI) of each station was calculated, and the meteorological drought process of each station was statistically analyzed for the past 57 years. The spatial-temporal characteristics and hazard risk evaluation of meteorological drought were thoroughly investigated on a seasonal scale in the Circum-Bohai-Sea region. The results showed that both drought coverage area probability and drought duration decreased and drought intensity increased in spring during the period. However, in summer and autumn, both drought coverage area probability and drought duration increased, and drought intensity decreased. The probability of both drought coverage area and drought intensity increased and that of drought duration declined in winter over the study period. Comprehensively, the

收稿日期:2018-06-15; 网络出版日期:2018-00-00

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA19060205);国家自然科学基金 Belmont 论坛国际合作项目(NSFC-BF/ICFA,31461143032)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xyhou@yic.ac.cn

extent and influence of drought were the most severe in spring, followed by summer and autumn; the drought in winter was relatively slight in the Circum-Bohai-Sea region from 1961 to 2017. Spatially, high values for seasonal drought intensity and drought frequency were observed northwest of Liaoning Province, central and southern Hebei Province, and most parts of Shandong Province. However, low values for seasonal drought intensity and drought frequency were mainly detected in east of Liaoning Province. The distribution of drought hazard risks in all seasons generally presented a similar spatial pattern, "west-high east-low and south-high north-low," in the study area. Specifically, the hazard risk of meteorological drought was generally high in central and south of Hebei Province, but low in east of Liaoning Province. Moreover, the hazard risk of meteorological drought was generally high in spring but low in winter. This study was performed to support the mitigation of drought hazard risks and improve the management of the ecological environment in the Circum-Bohai-Sea region.

Key Words: Meteorological drought; MCI; Hazard risk; Spatial-temporal characteristics

近年来,在全球气候变暖的大背景下,干旱灾害已发展成为对人类社会影响最广泛、最严重的主要气候灾 害之一,对生态环境和社会经济发展造成的影响越来越强烈,由此带来的损失也不断增加^[1-3]。例如,自 2010 年以来,非洲地区先后发生了多次重度干旱事件,引发上千万人遭遇饥荒乃至霍乱,更导致索马里地区近 3 万 名儿童丧失生命^[4-5];2012年,美国约三分之二的国土面积遭受了中度以上的干旱灾害,对农业生产和经济增 速造成重创^[6];欧洲、大洋洲等地区也遭遇了严重的干旱灾害,给当地水资源管理以及农业发展等带来重大 损失^[7-8]。我国干旱灾害发生频次约占总自然灾害的 1/3,平均每年干旱受灾面积约占总受灾面积的 57%,干 旱灾害损失占总自然灾害损失的 15%以上^[9]。因其多发性、普遍性和高致灾性等特征,干旱灾害已对人类社 会可持续发展构成严重威胁,因此,干旱过程的确定、干旱演变特征以及干旱灾害的评估等问题越来越受到国 内外学者的关注和重视^[10-14]。

干旱主要分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱^[15],其中,气象干旱是其他各类干旱发生的 主要原因,其评估结果可作为进一步探究其他干旱灾害特征的依据^[16-17]。气象干旱指数是指基于气象要素 并根据一定的计算方法所获得的指标,主要用于监测和评价某区域特定时段内因天气气候异常引起的水分亏 欠程度^[18-19]。目前,国内外应用较广泛的气象干旱指数主要有 SPI^[20]、PDSI^[21]、SPEI^[22]和 Z 指数^[23]等。上 述气象干旱指数基于降水或兼顾蒸散,适合多时间尺度和多空间尺度上的气象干旱演变规律分析,然而,它们 基本仅限于对干旱现象的简单描述,时间尺度未能达到逐日的精度,也无法评价更长时间的干旱累积效应。 由国家气象局提出的 CI 气象干旱指数同时考虑了降水和蒸散发对干旱形成的影响,可确定出干旱事件开始 和结束的日期,已在全国^[24]、区域^[25]以及地区^[12,16,26]等不同空间尺度上得到应用。尽管 CI 能较好的度量干 旱程度,为旱情分析提供有效的技术方法,但 CI 对降水过程反应过于敏感,而对长期降水偏少的干旱反应又 不够明显^[27]。鉴于此,国家气候中心定义了新的气象干旱综合指数(Meteorological drought Composite Index, MCI),主要针对 CI 存在的问题进行了改进,同时,MCI 增加考虑了前 150 天的降水状况,有效兼顾了更长时 间的干旱累积效应。相关研究表明,MCI 在继承 CI 对干旱监测优势的同时,有效地规避了其不符合干旱发展 规律的跳变问题^[28-32],在干旱评估和旱情监测方面更科学和合理。

环渤海地区地处东北亚经济圈的中心地带,是我国重要的工农业基地。近十几年来,该区域年平均气温显著升高,降水总量持续偏少,气候暖干化态势明显,干旱状况趋于严重。例如,郭军等^[33]分析了1961—2007年环渤海地区降水状况的变化特征,发现该地区降水普遍减少,干旱程度加重;王璐璐等^[34]基于 Z 指数分析了环渤海地区的旱涝特征,结果表明该区域的气候总体呈暖干化趋势,其中,1988年气温发生增温突变后,区域内旱灾显著增加。马露^[35]利用 SPEI 指数分析得出环渤海地区干旱多发区主要分布在辽宁西部、渤海湾沿岸以及京津冀中部,而辽宁东部较少发生干旱事件。虽然上述研究已对环渤海地区干旱演变特征有所发现,但仍缺乏长时间序列季节尺度上干旱事件的时空特征分析,气象干旱的致灾危险性评估也尚属空白。因此,本文利用改进的新气象干旱综合指数 MCI,从季节尺度出发,探究环渤海地区 1961—2017 年气象干旱的时空

演变特征,并进一步定义干旱致灾危险性指数,评价该区域气象干旱致灾危险性的格局特征,以期为环渤海地 区的干旱评估、干旱灾害防治和防御等提供科学依据,为区域水资源合理开发利用和农业可持续发展等提供 科学参考,促进环渤海地区生态环境的健康和良性发展。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

环渤海地区介于 34°23′—43°26′ N,113°04′—125°46′ E之间,由辽东半岛、山东半岛和华北平原组成,呈 "C"字形雄踞于我国东部沿海的北部,辖辽宁、河北和山东三省以及北京和天津两直辖市,总面积约 52.3 万 km²,约占全国陆地总面积的 5.4%(图 1)。环渤海地区年平均气温在 8—12℃之间,年降水量介于 400—1000 mm 之间,降水主要集中在夏季,尤以 7、8 月份居多。该区域属于暖温带半湿润季风性气候,光照充足,四季 分明,其中,春季干旱少雨、夏季炎热多雨、秋季冷暖适中、冬季寒冷干燥。环渤海地区地势总体呈北高南低、 西高东低的空间格局特征,地形地貌以平原和低山丘陵为主,也分布有高原和盆地等类型。区域内海洋渔业、 矿产以及油气等资源丰富,交通网络发达,工业设施密集,耕地面积广袤,是我国经济发展的重要战略区域,其 中,临海—线的港口城市,例如,大连、天津、秦皇岛、青岛、烟台以及威海等在我国对外开放的沿海发展战略中 占据着重要地位。

1.2 数据来源与预处理

气象资料来源于中国气象局气象数据中心提供的 1961—2017 年中国地面气候资料日值数据集。选用该数据集中环渤海地区 83 个气象站点的气象数据,依据历史数据记录应超过 50 a 以及连续缺测数据不能超过一个月为标准,并进一步通过真实值计算和均一化检验^[36]等步骤,最终选取出环渤海地区 60 个地面气象站点(图 1)的日平均气温和日降水量数据。



图 1 环渤海地区地理位置及地面气象站点分布

Fig.1 Location of Circum-Bohai-Sea region and distribution of surface meteorological stations

1.3 研究方法

1.3.1 气象干旱综合指数 MCI

(1)气象干旱综合指数 MCI 的定义

气象干旱综合指数 MCI 是对原综合气象干旱指数 CI 的改进和发展。与 CI 的计算方法相比较, MCI 的计算新引进了近 60 天标准化权重降水指数和季节调节系数,其计算公式如下:

$$MCI = a \times SPIW_{60} + b \times M_{30} + c \times SPI_{90} + d \times SPI_{150}$$
(1)

式中,SPIW₆₀是近 60 天标准化权重降水指数,其基于 60 天滑动加权平均降水计算得到^[37]; *M*₃₀ 代表近 30 天的相对湿润度指数; SPI₉₀和 SPI₁₅₀分别是近 90 天和近 150 天的标准化降水指数; *a*、*b*、*c*和*d*为各项权重系数,其取值需根据地区和季节的变化作灵活调整,本文将冬半年(10月到次年 3月)的4个系数分别确定为0.2、0.2、0.3和0.4,夏半年的(4—9月)分别确定为0.3、0.5、0.3和0.2^[38]。MCI 引进标准化权重降水指数,考虑了前期更长时间降水对当前干旱的影响,与*CI*相比,不仅解决了干旱监测发生跳跃的问题,同时克服了*CI*反映干旱偏轻以及时空不连续等缺陷^[32,39]。基于 MCI 划分的气象干旱等级如表1所示。

(2) 基于 MCI 的气象干旱评估

参考国家标准《气象干旱等级》^[40],根据相应的定义方法确定出气象干旱过程、干旱持续时间和干旱强 度等,并定义干旱发生频率和干旱覆盖范围等指标^[16],以季节为研究尺度对环渤海地区 1961—2017 年气象 干旱的演变规律进行探究。对季节划分作如下定义:3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月和 次年的 1、2 月为冬季。

干旱发生频率的计算公式为:

$$p = \frac{n}{N} \times 100\% \tag{2}$$

式中, p为干旱发生频率; n 是实际有干旱事件发生的年数; N 指资料年代序列数,由于 MCI 的计算是向后滚 动的,本文带入资料计算的 MCI 值是从 1962 年开始,因此 N 取 56。

干旱覆盖范围的计算公式为:

$$S = \frac{m}{M} \times 100\% \tag{3}$$

式中,S为干旱覆盖范围;m为每年有干旱事件发生的站点个数,M为气象站点总个数。

计算环渤海地区历年所有气象站点和各站点所有年份达到轻旱以上干旱等级的所有干旱天数的 MCI 值 之和,分别取各自的平均值,前者即是历年研究区干旱强度的区域均值,后者是各站点干旱强度的多年均值, 分别用以评价干旱强度的时间变化特征和空间格局特征。

Table 1 Drought classification based on MCI									
干旱等级 Drought level	MCI 取值范围 Ranges of MCI	干旱类型 Drought classification	干旱等级 Drought level	MCI 取值范围 Ranges of MCI	干旱类型 Drought classification				
1	-0.5 <mci< td=""><td>无旱</td><td>4</td><td>-2.0<mci≤-1.5< td=""><td>重旱</td></mci≤-1.5<></td></mci<>	无旱	4	-2.0 <mci≤-1.5< td=""><td>重旱</td></mci≤-1.5<>	重旱				
2	-1.0 <mci≤-0.5< td=""><td>轻旱</td><td>5</td><td>MCI≤-2.0</td><td>特旱</td></mci≤-0.5<>	轻旱	5	MCI≤-2.0	特旱				
3	-1.5 <mci≤-1.0< td=""><td>中旱</td><td></td><td></td><td></td></mci≤-1.0<>	中旱							

表 1 基于 MCI 的干旱等级划分

MCI:综合气象干旱指数 Meteorological drought Composite Index

1.3.2 干旱致灾危险性评价

对于某地区而言,干旱发生频率和干旱强度对干旱灾害的形成起决定性影响作用,因此,本文参考李红英 等^[41]的研究方法,基于干旱发生频率和干旱强度定义干旱致灾危险性指数 R,其计算公式为:

$$R = p \times I \tag{2}$$

式中,p为各站点的干旱发生频率,I为各站点的干旱强度。

进一步对干旱致灾危险性指数 R 进行归一化处理,计算方法为:

$$N_{i} = (R_{i} - R_{\min}) / (R_{\max} - R_{\min})$$
(3)

式中, N_i 为第 i 个气象站的干旱致灾危险性指数归一化值, R_i 为第 i 个站的干旱致灾危险性指数, R_{max} 和 R_{min} 分别表示第 i 个气象站危险性指数序列中的最大值和最小值, i 代表 1—60 个气象站点。

将经过归一化处理后的干旱致灾危险性指数作为区划指标,对环渤海地区各季节气象干旱的致灾危险性 等级进行划分,共划分为低危险性、较低危险性、中危险性、较高危险性和高危险性共5个危险性等级。各等 级划分标准见表2。

表 2	环渤海地区基于致灾危险性指数的干旱危险性等级

Table 2 Drought hazard classifications based on hazard risk index in Circum-Bonai-Sea region								
危险性等级 Hazard level	致灾危险性指数 R 的取值范围 Ranges of hazard risk index	危险性类型 Hazard classification	危险性等级 Hazard level	致灾危险性指数 R的取值范围 Ranges of hazard risk index	危险性类型 Hazard classification			
1	0< <i>R</i> ≤0.15	低危险性	4	$0.75 < R \le 0.90$	较高危险性			
2	$0.15 < R \le 0.50$	较低危险性	5	$0.90 < R \le 1.00$	高危险性			
3	$0.50 < R \le 0.75$	中危险性						

采用 ArcGIS 中反距离权重插值方法对各气象站的危险性指数进行空间插值,得到环渤海地区气象干旱 致灾危险性等级区划图。

2 结果与分析

2.1 气象干旱的时间变化特征

2.1.1 干旱覆盖范围的年际变化特征

1961—2017年环渤海地区各季节干旱覆盖范围的变化趋势如图2所示。



图 2 1961—2017 年环渤海地区各季节干旱覆盖范围的变化趋势

Fig.2 Trends of seasonal drought coverage area probability in Circum-Bohai-Sea region during 1961-2017

春季,干旱覆盖范围总体呈下降趋势,干旱覆盖范围的多年均值为65.4%。共有12年的春旱覆盖范围超过90%,达大范围干旱发生标准,其中,1984年干旱覆盖范围为100%,表明全区域均发生春旱事件。1964年和1990年的干旱覆盖范围为0,表明这些年份研究区无春旱发生。从各年代来看,1970s春旱最普遍,平均覆盖范围达74%,1960s平均覆盖范围最少,约为52.7%。

夏季,干旱覆盖范围呈上升趋势,多年均值为 58.4%。1965 年、1972 年、1992 年、1996—1997 年以及 1999—2001 年共 8 年夏旱覆盖范围在 90%以上,其中,1965 年和 1972 年的覆盖范围均为 98.4%,夏旱发生范围最广。相反,夏季干旱覆盖范围最小值为 1964 年的 6.7%,干旱发生范围较少。各年代中,1980s 夏旱平均 覆盖范围最广,为 65.3%,1960s 最小,为 51.9%。

秋季,干旱覆盖范围呈增加趋势,多年均值为44.4%。2002年秋旱覆盖范围最广,为91.7%,1964年无秋 旱发生,其余年份干旱覆盖范围不一,但均无大范围秋旱发生。各年代中,21世纪初期秋旱发生范围最广,平 均覆盖范围为59.3%,1970s最小,平均覆盖范围为29.8%。

冬季,干旱覆盖范围呈上升趋势,多年均值为39.9%。各年份均有一定范围的冬旱发生,其中,1983年发生了大范围干旱事件。各年代中,1980s冬旱覆盖范围最广,为52.0%,1970s最小,仅为28.5%。

对环渤海地区各季节干旱覆盖范围的年际变化趋势进行 M-K 显著性检验,发现各季干旱覆盖范围的线性变化趋势均不显著。

2.1.2 干旱持续日数的年际变化特征

1961—2017年,环渤海地区各季节干旱持续日数的变化趋势如图3所示。



图 3 1961—2017 年环渤海地区各季节干旱持续日数的变化趋势 Fig.3 Trends of seasonal drought duration in Circum-Bohai-Sea region during 1961—2017

春季,干旱持续日数呈下降趋势,多年均值为 39 d。春旱持续日数最长是 1996 年的 78 d,1990 年持续日数为0 d,无春旱发生。各年代中,1980s 和 1990s 春旱平均持续日数最长,约 44 d,1970s 次之,为 42 d,其余年代春旱平均持续日数均在 30 d 左右。近 57 a 中,春旱持续日数超过 46 d(季节总天数的一半)的年份共有 21 年,其中,1974—1977 年连续 4 年春旱持续日数过半,干旱持续时间较长。

夏季,干旱持续日数呈弱上升趋势,多年均值为 33 d。2000 年夏旱持续日数最长,为 70 d,1964 年的最短,仅 3 d。各年代中,1980s 夏旱平均持续日数最长,为 38 d,其余各年代的均介于 30—34 d 之间。夏旱持续日数超过季节总天数一半的年份共有 13 年,各年代均有分布。

秋季,干旱持续日数整体呈增加趋势,多年平均值为 30 d。秋旱持续时长最长的是 2002 年的 74 d,最短 的是 1964 年的 0 d,无秋旱发生。各年代中,1980s 秋旱平均持续时间最长,为 37 d,1970s 的最短,仅 19 d,其 余年代的均在 30 d 左右。秋旱持续时长超过季节半数的共有 18 年,主要出现在 21 世纪初期和 1980s。

冬季,干旱持续日数呈下降趋势,多年均值为25 d。冬旱持续时间最长为1983年的68 d,2003年和2012年的最短,均为2 d。各年代中,1980s冬旱平均持续日数最长,为33 d,1970s的最短,为16 d,其余年代的均约为25 d。冬旱持续日数超过季节总日数一半的年份共有9年,除1970s以外,其余年代均有分布。

显著性检验表明,1961—2017年环渤海地区各季节干旱持续日数的线性变化趋势均不显著。

2.1.3 干旱强度的年际变化特征

1961—2017年,环渤海地区各季节干旱强度区域均值的变化趋势如图4所示。





春季,干旱强度呈增加趋势,多年均值为-36.5。1996年春旱强度为-82.6,为最高值,最低值是1990年的-0.2。各年代中,1980s的平均干旱强度最高,为-42.3,1990s和1970s次之,平均干旱强度均约为-40.0,其余年代的一般在-30.0左右。

夏季,干旱强度总体呈下降趋势,多年平均值为-30.7。1972年夏季干旱强度最高,达-85.0,1964年的最低,仅为-1.9。就各年代而言,1980s、1990s以及21世纪初期夏旱强度均在-30.0左右,其余年代的均略低。

秋季,干旱强度总体呈下降趋势,多年均值为-27.5。秋旱最强年份为2002年,干旱强度达-85.7,最弱年是1964年,干旱强度为0。各年代中,1980s秋旱强度最高,平均为-33.6,其次是21世纪初期的-31.9,1970s最弱,为-16.2,其余年代的秋旱平均强度均在-25.0左右。

冬季,干旱强度呈上升趋势,多年均值为-19.7。1983年冬旱强度最高,为-68.4,2012年的最弱,仅-1.0。 各年代冬旱平均强度均相对较低,其中,1970s的最低,为-11.8,其余年代的均在-20.0左右。 显著性检验结果表明,1961—2017年环渤海地区各季节干旱强度的变化趋势均不显著。

2.2 气象干旱的空间分布特征

2.2.1 干旱强度的空间分布特征

1961—2017年,环渤海地区各季节干旱强度多年均值的空间分布特征如图 5 所示。整体而言,研究区春季干旱强度最强,夏、秋季居中,冬季干旱强度最弱。

春季,各气象站点的干旱强度在-42.2 至-27.8 之间,其绝对值在 40.0 以上的站点个数为 8 个,占比约为 13.3%,主要分布在河北省中南部;春旱强度介于-40.0 到-30.0 之间的站点个数最多,占比为 85%,该类站点 广泛分布在辽宁、山东和河北北部;仅辽宁省宽甸站春旱强度的绝对值在 30.0 以下。

夏季,环渤海地区各站点的干旱强度介于-38.8 至-17.1 之间,其中,干旱强度的绝对值在 30.0 以上的站 点比例约为 61.7%,主要位于辽宁西部、河北中南部和山东省内,上述地区的夏旱强度相对较强;辽宁东部和 河北北部夏旱强度的绝对值多在 30.0 以下,尤其是辽宁东部的清原-桓仁-宽甸一带,夏旱强度的绝对值基本 在 20.0 左右,干旱强度较低。

秋季,各站点的干旱强度在-32.1到-19.4之间,干旱强度绝对值高于 30 的站点比例约为 16.7%,主要分 布在京津唐地区及辽宁西北部;多数站点的秋旱强度在-30.0和-25.0之间,该类站点的占比约为 66.7%,广 泛分布在整个环渤海地区;仅约 16.7% 的站点的秋旱强度绝对值在 25.0 以下,辽宁东部地区多分布该类 站点。

冬季,各气象站点的干旱强度介于-25.6至-15.5之间,其中,山东济南站冬旱强度为-25.6,干旱强度最大;约33.3%的站点冬旱强度在-25.0到-20.0之间,其主要分布于山东和河北中南部;冬旱强度的绝对值在20.0以下的站点个数最多,占比约为65%,主要分布在辽宁和河北北部,这些区域的冬旱强度相对较低。

2.2.2 干旱频率的空间分布特征

1961—2017年,环渤海地区各季节干旱频率的空间分布特征如图 6 所示。整体上,环渤海地区春旱频率 最高,冬旱频率最低,大部分站点夏、秋两季的干旱频率相近。

春季,研究区各站点的干旱频率介于 45.6%—79.0%之间;除辽宁宽甸以外,其余各站点的春旱频率均在 50%以上,高值区主要位于辽宁西部和南部、河北以及山东大部分地区。

夏季,各气象站点的干旱频率介于 38.5%—72.0%之间;夏旱频率较高的区域主要分布在河北中南部,其中,饶阳和南宫的夏旱发生率最高,频率达 70%以上;辽宁东北部、河北北部以及山东西南部夏旱发生率相对 较低,一般在 50%以下,其中,山东泰山的夏旱频率最低,仅为 38.5%。

秋季,干旱频率在 33.3%—52.7% 之间,各站点秋旱频率的整体差距相对较小,其中,秋旱频率介于 40.0%—50.0%之间的站点个数最多,占比达 83.3%;秋季干旱发生率在 50%以上和 40%以下的站点个数分别 为 3 个和 7 个,分别占总站点个数的 5.0%和 11.7%,前者主要位于辽宁西南沿海和山东半岛东部,后者多分 布在辽宁东北部和山东西北部。

冬季,各站点的干旱频率介于 29.8%—50.9%;辽宁和河北东北部的冬旱发生率普遍较低,干旱频率多在 40%以下,占比为 51.7%;而河北南部和山东大部分地区冬旱发生率在 40.0%—50.0% 之间,占总站点数 的 45%。

2.3 干旱致灾危险性等级的空间分布特征

1961—2017年,环渤海地区各季节干旱致灾危险性等级的空间分布特征如图 7 所示。总体上,研究区各季节干旱致灾危险性等级呈西高东低、南高北低的格局特征。

春季,辽宁西部和辽东半岛南端、河北以及山东内陆大部分地区干旱致灾危险性均处于中等级别以上,其 中,河北中南部和北部围场一带处于较高等级以上的干旱致灾危险性区域;辽宁东部和山东东部沿海地区春 季干旱的致灾危险性等级相对较低。

夏季,干旱致灾危险性较高的区域集中分布在河北省西南部;辽宁西部及渤海湾东部沿海一带、河北中南



图 5 1961—2017 年环渤海地区各季节干旱强度的空间分布 Fig.5 Spatial distribution of seasonal drought intensity in Circum-Bohai-Sea region during 1961—2017

部和山东大部分地区夏季干旱致灾危险性均处于中等级别;而辽宁东部、河北东北部以及山东省泰山、日照等 零星地区夏旱致灾的危险性相对较低。

秋季,干旱致灾危险性等级的空间差异相对较小,除辽宁东部、河北围场-承德-遵化一带以及山东惠民-济 南-泰山一带的致灾危险性较低以外,其他地区秋旱致灾危险性均在中等级别以上,其中,中危险性等级的分 布范围最为广泛。

冬季,以河北保定-饶阳至山东惠民-东营为界,以北地区的冬旱致灾危险性基本处于较低级别以下,以南 的多处于中危险性等级以上,其中,冬旱致灾低危险性的区域主要分布在辽宁东北部和河北东北部,而致灾危 险性较大的地区主要位于河北的邢台和南宫、山东的济南和海阳-青岛一带。

3 讨论与结论

1961—2017年环渤海地区春旱覆盖范围和持续日数总体呈下降趋势,干旱强度有所增强;夏、秋两季干旱覆盖范围和持续日数均呈上升趋势,干旱强度下降;冬季干旱覆盖范围和干旱强度均增加,但干旱持续日数



图 6 1961—2017 年环渤海地区各季节干旱频率的空间分布 Fig.6 Spatial distribution of seasonal drought frequency in Circum-Bohai-Sea region during 1961—2017

呈下降趋势。综合上述干旱指标的变化趋势可知,环渤海地区气象干旱总体较严重,进一步证实了王璐璐 等^[34]利用 Z 指数和马露^[35]基于 SPEI 分析得出该地区旱灾显著增加的研究结果。从各季节干旱的空间格局 来看,环渤海地区春旱尤为突出,夏、秋季旱情居中,冬旱相对最轻。春旱多发区主要位于河北中南部和北部 围场一带,这些地区也属于春季干旱高致灾危险性区域;辽宁西部、河北以及山东大部分地区易发生夏、秋季 干旱,夏旱致灾危险性一般位于中等级别以上;冬旱多发区主要在河北南部和山东大部分地区。吴琼等^[30]、 Wang 等^[16]和张金龙等^[42]利用 MCI 或 CI 指数分别分析辽宁、山东以及河北地区气象干旱空间差异所得研究 结果与本文结果基本一致。但马露^[35]的研究结果认为,山东省春旱最严重、河北省次之,与本文所得出的河 北省春旱最严重的结果存在差异,原因可能在于所采用的气象干旱指数不一样,两者的计算方法存在一定的 差异,其评价结果精准度的比较有待于结合实际旱情记录等进一步深入探究。

气温和降水是影响气象干旱的直接因素,而水热条件变化的成因则相对复杂,其通常与大气环流、太阳黑子活动以及海表热力状态等相关联^[34:35,43]。从年内变化来看,季风气候是决定环渤海地区气象干旱季节特征形成的主要因素。环渤海地区位于暖温带半湿润季风气候区,夏季盛行东南季风,降水充足,易涝难旱;冬季多刮偏北风,气温偏低,蒸散量小,不易发生干旱;春季少雨,气温回升较快,蒸散发旺盛,容易发生干旱事



图 7 1961—2017 年环渤海地区各季节干旱致灾危险性等级的空间分布 Fig.7 Spatial distribution of seasonal drought hazard classification in Circum-Bohai-Sea region during 1961—2017

件。对于秋季而言,该季节气温冷暖适中,干旱发生受降水影响较大,已有研究表明,太阳黑子的剧烈活动可 导致环渤海地区秋季降水的减少,进而引发秋旱^[35]。环渤海地区临西北太平洋,与同纬度陆地区域相比,该 地区热量变化受海洋和大陆的共同影响,而海陆间热力变化会引起大气活动强度和位置等的改变,进而影响 区域降水,最终对该地区干旱形成也产生一定程度的影响^[43]。

从自然地理角度来看,环渤海地区地形、土壤等因素也对干旱格局的形成产生一定的影响。例如,辽宁千 山山脉一带属迎风坡地形,当暖湿气流遇到高山阻碍时,气流被迫沿着山坡上升,海拔高度越高气温越低,迫 使暖湿气流的温度下降,水蒸气开始冷凝,产生降雨,因而辽宁东南部一带干旱事件相对少发,致灾危险性普 遍较低;到达逆风坡的气流一般比较干燥,降水较少,因此,辽西地区相对更易发生干旱。土壤蓄水能力也会 对气象干旱的形成与发展产生一定的影响,例如,辽宁西部地区属于丘陵地带,年降水量较少,易发生干旱事 件,且该地区土壤以沙土为主,蓄水能力差,降水时水分渗漏过快,径流较多,导致水分利用不充分,干旱一旦 形成,旱情更易严重化[44-45]。

本文通过对环渤海地区 1961—2017 年气象干旱的时空特征及致灾危险性进行综合分析,得出以下结论:

(1)环渤海地区春旱覆盖范围和持续日数呈下降趋势,但干旱强度有所增强;夏、秋两季干旱覆盖范围和持续日数均呈上升趋势,而干旱强度有所减弱;冬季干旱覆盖范围和干旱强度均呈增加状态,干旱持续日数有所下降。

(2)环渤海地区春季干旱覆盖范围、干旱持续日数、干旱强度以及干旱发生频率均居四季之首,干旱状况 最严重,夏、秋季次之,冬季干旱相对最轻。

(3)环渤海地区各季节干旱强度和干旱发生频率的高值区主要分布在辽宁西北部、河北中南部和山东大部分地区,低值区主要位于辽宁东部地区。

(4)环渤海地区各季节干旱致灾危险性等级总体呈西高东低、南高北低的分布特征,其中,河北中南部气象干旱的致灾危险性总体较高,辽宁东部地区的较低;研究区春旱致灾危险性总体较高,夏、秋季次之,冬季最低。

MCI 基于气温和降水数据计算得来,仅可用于分析气象干旱的过程与特征,而环渤海地区受土壤墒情、水资源开发与利用、农业生产模式以及社会经济发展等众多因素的共同影响,实际干旱情势的定性分析和干旱 对农业、林业等生态系统影响的定量评估等仍存在一定的挑战。未来时期,将继续致力于环渤海乃至中国沿 海地区不同类型干旱的演变和干旱对生态系统影响的定量评估研究,并结合 IPCC 未来排放情景以及气候模 式等,对区域干旱的发展及致灾风险等进行模拟和预测。

参考文献(References):

- [1] Tu X J, Wu H O, Singh V P, Chen X H, Lin K R, Xie Y T. Multivariate design of socioeconomic drought and impact of water reservoirs. Journal of Hydrology, 2018, 566: 192-204.
- [2] Naumann G, Barbosa P, Garrote L, Iglesias A, Vogt J. Exploring drought vulnerability in Africa: an indicator based analysis to be used in early warning systems. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(5): 1591-1604.
- [3] Ezzine H, Bouziane A, Ouazar D. Seasonal comparisons of meteorological and agricultural drought indices in Morocco using open short time-series data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 26: 36-48.
- [4] 杞人. 干旱肆虐: 非洲之角饱受饥荒之灾. 生态经济, 2011, (10): 8-13.
- [5] 孙劭, 王东阡, 尹宜舟, 王国复, 柯宗建. 2017 年全球重大天气气候事件及其成因. 气象, 2018, 44(4): 556-564.
- [6] 宋莉莉,王秀东.美国世纪大旱引发的思考——农业生产中如何应对极端气候变化.中国农业信息,2013,(6):13-14.
- [7] 王东阡,王腾飞,任福民,龚志强,王遵娅,李多. 2012年全球重大天气气候事件及其成因. 气象, 2013, 39(4): 516-525.
- [8] 王艳姣, 高蓓, 周兵, 姜彤, 龚志强, 司东. 2013 年全球重大天气气候事件及其成因. 气象, 2014, 40(6): 759-768.
- [9] 张强,韩兰英,张立阳,王劲松.论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略.地球科学进展,2014,29(1):80-91.
- [10] Salehnia N, Alizadeh A, Sanaeinejad H, Bannayan M, Zarrin A, Hoogenboom G. Estimation of meteorological drought indices based on AgMERRA precipitation data and station-observed precipitation data. Journal of Arid Land, 2017, 9(6): 797-809.
- [11] Kim H, Park J, Yoo J, Kim T W. Assessment of drought hazard, vulnerability, and risk: a case study for administrative districts in South Korea. Journal of Hydro-environment Research, 2015, 9(1): 28-35.
- [12] 张调风,张勃,王有恒,刘秀丽,安美玲,张建香.基于综合气象干旱指数的石羊河流域近 50 年气象干旱特征分析. 生态学报, 2013, 33 (3): 975-984.
- [13] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts. Journal of Hydrology, 2010, 391(1/2): 202-216.
- [14] Logan K E, Brunsell N A, Jones A R, Feddema J J. Assessing spatiotemporal variability of drought in the U.S. central plains. Journal of Arid Environments, 2010, 74(2): 247-255.
- [15] Wilhite D A, Glantz M H. Understanding: the drought phenomenon; the role of definitions. Water International, 1985, 10(3): 111-120.
- [16] Wang X L, Hou X Y, Li Z, Wang Y D. Spatial and temporal characteristics of meteorological drought in Shandong Province, China, from 1961 to 2008. Advances in Meteorology, 2014, 2014: 873593, http://dx.doi.org/10.1155/2014/873593.
- [17] 李忆平,李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展. 干旱气象, 2017, 35(5): 709-723.
- [18] Yang Q, Li M X, Zheng Z Y, Ma Z G. Regional applicability of seven meteorological drought indices in China. Science China Earth Sciences,

2017, 60(4): 745-760.

- [19] 张俊,陈桂亚,杨文发.国内外干旱研究进展综述.人民长江,2011,42(10):65-69.
- [20] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales//Preprints of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, CA: American Meteor Society, 1993: 179-184.
- [21] Palmer W C, Bureau E U W. Meteorological Drought. Research Paper No. 45. Washington D.C.: U.S. Weather Bureau, 1965.
- [22] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration Index. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [23] 曹永强, 路璐, 张兰霞, 杨春祥, 苏阳. 基于 Z 指数的辽宁省气象干旱时空特性分析. 资源科学, 2012, 34(8): 1518-1525.
- [24] 邹旭恺,任国玉,张强.基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究.气候与环境研究,2010,15(4):371-378.
- [25] 赵海燕,高歌,张培群,延晓冬.综合气象干旱指数修正及在西南地区的适用性.应用气象学报,2011,22(6):698-705.
- [26] 包云轩, 孟翠丽, 申双和, 邱新法, 高苹, 刘聪. 基于 CI 指数的江苏省近 50 年干旱的时空分布规律. 地理学报, 2011, 66(5): 599-608.
- [27] 王春林,郭晶,薛丽芳,丁丽佳.改进的综合气象干旱指数 CInew 及其适用性分析.中国农业气象, 2011, 32(4): 621-626, 631-631.
- [28] 杨丽慧,高建芸,苏汝波,林秀芳.改进的综合气象干旱指数在福建省的适用性分析.中国农业气象,2012,33(4):603-608.
- [29] 杨帆,陈波,张超,余代辉.新气象干旱综合监测指数(MCI)在黔东南本地化应用.高原山地气象研究,2015,35(3):56-61.
- [30] 吴琼, 赵春雨, 王大钧, 李倩, 伍俊艺, 林蓉. 1951—2014 年辽宁省气象干旱时空特征分析. 干旱区资源与环境, 2016, 30(3): 151-157.
- [31] 廖要明, 张存杰. 基于 MCI 的中国干旱时空分布及灾情变化特征. 气象, 2017, 43(11): 1402-1409.
- [32] 李红梅,李林,李万志. 气象干旱监测指标在青海高原的适用性分析. 干旱区研究, 2018, 35(1): 114-121.
- [33] 郭军,任国玉,李明财.近47年环渤海地区不同级别降水事件变化.地理研究,2010,29(12):2271-2280.
- [34] 王璐璐, 延军平, 李敏敏, 王鹏涛, 曹永旺. 气候暖干化背景下环渤海地区旱涝时空响应. 水土保持通报, 2015, 35(2): 279-286.
- [35] 马露. 1961—2014年环渤海地区气象干旱时空变异与成因分析. 兰州:西北师范大学, 2016.
- [36] Su B D, Jiang T, Jin W B. Recent trends in observed temperature and precipitation extremes in the Yangtze River basin, China. Theoretical and Applied Climatology, 2006, 83(1/4): 139-151.
- [37] 赵海燕,侯美亭,刘文平,马雅丽.干旱指数在山西逐日监测中的适用性研究.干旱气象,2014,32(4):505-515.
- [38] 张存杰,王胜,宋艳玲,蔡雯悦.我国北方地区冬小麦干旱灾害风险评估.干旱气象,2014,32(6):883-893.
- [40] 成青燕,高晓清,林纾,赵红岩,杨苏华.基于 MCI 指标的甘肃省近 50 年干旱特征分析.干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 211-218.
- [41] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 20481—2017 气象干旱等级. 北京:中国标准出版 社, 2017.
- [42] 李红英,张晓煜,王静,郑广芬,王素艳.基于 CI 指数的宁夏干旱致灾因子特征指标分析.高原气象, 2014, 33(4): 995-1001.
- [43] 张金龙,刘学锋,于长文.河北省干旱分布特征和变化规律分析.干旱区研究,2012,29(1):41-46.
- [44] 龚道溢,王绍武.大气环流因子对北半球气温变化影响的研究.地理研究,1999,18(1):31-38.
- [45] 安昕, 张国林. 辽宁西部半干旱区近 50 年降水趋势及周期变化. 中国农学通报, 2012, 28(5): 214-220.
- [46] 张淑杰,张玉书,李广霞,戴萍,刘晓梅,赵先丽.辽宁省旱灾的分布特征及其成因分析.中国农学通报,2013,29(5):199-203.