

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0029

果华雯,张元伟,宋小燕,等. 中国南北过渡带干旱时空变化[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 79-85, 158. GUO H W, ZHANG Y W, SONG X Y, et al. Spatiotemporal changes of drought in the north-south transitional zone of China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 79-85, 158. (in Chinese)

中国南北过渡带干旱时空变化

果华雯¹, 张元伟¹, 宋小燕¹, 张静¹, 刘国庆²

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 2. 辽宁省辽阳水文局, 辽宁 辽阳 111000)

摘要:为识别中国南北过渡带的干旱状况,利用研究区内1960—2015年32个气象站逐月降水量和月平均气温等资料,计算每个站点的逐月综合气象干旱指数CI,并利用累积距平法等分析中国南北过渡带干旱变化情况。结果表明:就时间变化而言,干旱强度、干旱历时以及不同等级的干旱发生频率随时间均呈上升趋势,并且,轻旱在所有等级干旱中占比最重,为55.6%;就季节变化而言,干旱的发生具有季节性规律,春旱的强度最大,且历时较长,夏旱最易发生,秋旱的发生频率总体呈现出先增大后减小的趋势,在20世纪90年代达到最大值,冬旱的历时值最短;就空间变化而言,研究区内北部相对干旱,南部相对湿润,武都地区和研究区内的河南地区最为干旱,甘肃南部反而是整个研究区最湿润的地区。

关键词:干旱;综合气象干旱指数;时空变化;中国南北过渡带

中图分类号:P426 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Spatiotemporal changes of drought in the north-south transitional zone of China

GUO Huawen¹, ZHANG Yuanwei¹, SONG Xiaoyan¹, ZHANG Jing¹, LIU Guoqing²

(1. Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Liaoning Liaoyang Hydrology Bureau, Liaoyang 111000, China)

Abstract: In order to identify the occurrence of drought in the north-south transitional zone (Qinling-Dabashan) of China, this paper used monthly precipitation and mean temperature of 32 meteorological stations from 1960 to 2015 to calculate the monthly drought in the study area. The meteorological drought index CI and the cumulative anomaly method based on the principle of meteorological drought classification were used to analyze the drought changes in the north-south transitional zone of China. The results showed that the drought intensity, duration and frequency of different levels of drought increased with time, and the light drought accounted for the most in all levels of drought, which was 55.6%. The occurrence of drought had a seasonal pattern. The intensity of spring drought was the largest and the duration was long. The summer drought was the most likely to occur. The frequency of autumn drought generally increased first and then decreased, reaching maximum in the 1990s. The duration of winter drought was relatively short compared to other seasons. In terms of spatial change, the northern part of the study area was relatively dry, and the south was relatively humid, the Wudu area and the Henan region was the airdest, whereas the southern part of Gansu was the wettest region in the entire study area.

Key words: drought; comprehensive meteorological drought index; time and space change; China north-south transition zone

收稿日期: 2019-04-21 修回日期: 2019-08-26 网络出版时间: 2019-09-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190919.0912.002.html>

基金项目: 国家科技基础资源调查专项(2017FY100904); 国家自然科学基金(41501022)

作者简介: 果华雯(1993—), 女, 河北承德人, 主要从事气象干旱方面的研究。E-mail: guohw0503@163.com

通信作者: 宋小燕(1983—), 女, 山西介休人, 副教授, 博士, 主要从事水文循环方面的研究。E-mail: xiaoyansong@nwsuaf.edu.cn

随着社会经济的发展和人口的增多,人类对水资源的需求不断增大^[1],加之变暖为背景的气候变化的影响,使得干旱的发生变得更加频繁^[2]。干旱作为最常见、最复杂的自然现象之一^[3],给自然生态和社会经济带来了极其不利的影 响^[4-6]。若干旱在大范围内持续不断,则可能引发社会不稳定及环境恶化等问题,产生干旱灾害(简称旱灾)^[7-8]。干旱通常被划分为气象干旱、农业干旱、水文干旱与社会经济干旱四种类型^[9],其中,气象干旱是其他干旱发生的基础,有着极其重要的研究意义。

根据水文气象灾害报告,干旱引发全球的粮食产量在近 50 年平均下降了 10.1%^[10]。世界上多个国家也深受干旱的影响^[11-13],比如埃塞俄比亚地区有 1 200~1 500 万人受到食物和水短缺的影响,并且该国 6 500 万人口中仍然有 85% 的人从事农业,1 600 万人生活在干旱地区^[14]。对于中国而言,大部分地区处于东亚季风区,是一个干旱灾害频发的国家^[15-17],干旱是造成我国农业经济损失最严重的气象灾害^[18],干旱造成粮食损失占有气象灾害造成粮食损失的 60% 左右,造成的经济损失达 58% 以上^[19]。我国每年不同地区都会发生不同程度的干旱,干旱发生频率高于世界水平。

针对气象干旱^[20-22],2006 年国家气候中心在单项干旱指标的基础之上颁布了综合气象干旱指数(CI)^[23],CI 同时考虑降水和蒸发,在气象干旱的研究中具有较大的优越性。目前为止,中国很多地区的干旱研究都采用了综合气象干旱指数的方法^[24-25],但是中国南北过渡带即秦巴山区的干旱状况研究却很少。中国南北过渡带不仅生物资源丰富多样,还是中国重要的水源涵养地,是南水北调中线工程的水源地^[26],是中国南北地区气候、物种的分界线,也是长江和黄河的分水岭,受其特殊地理环境及气候条件影响,该地区具有自然灾害种类多、强度大、成灾重等特点^[27]。鉴于此,本文拟对中国南北过渡带的干旱情况进行分析,揭示该过渡带干旱变化的差异性,以期气候变化下该研究区干旱的治理和减灾工作提供基础。

1 研究区概况

中国南北过渡带全长约 800 km,总面积约为 23.2 万 km²。秦指秦岭山脉,为东西走向,巴指大巴山脉,为西北朝东南走向。整个秦巴山是中国南北地区的分界线,是气候的分界线,是物种的分界线,也是长江和黄河的分水岭。南北过渡带多以高山山地为主,海拔高,大部分地区属于亚热带气候,

其以南为亚热带,以北则为暖温带。南北过渡带地形地势复杂,气候差异较大,多年平均降雨量在 600~1 300 mm,平均最高气温 35 ℃,平均最低气温 -12 ℃,年平均气温低于 16 ℃。降水严重分配不均,地表水蒸发量大,使得南北过渡带的干旱情况不容乐观。

2 资料与方法

2.1 研究资料

资料来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),下载了研究区内所有气象站的逐月降水量数据,平均最高、最低气温,日照时数,风速等资料。为提高选取资料的代表性,选用尽可能多的气象站点资料,同时确保资料的可靠性和一致性,最终选取 32 个气象站 1960—2015 年的气象站点资料来进行干旱特征分析。气象站点分布见图 1。



图 1 中国南北过渡带气象站点分布

Fig. 1 Distribution map of meteorological stations in the north-south transition zone of China

2.2 研究方法

2.2.1 综合气象干旱指数(CI)

根据相对湿润度指数和标准化降水指数的计算结果,参考《气象干旱等级》(GB/T 20481—2006)干旱指数的计算方法,计算得到各月的 CI 值。计算公式为

$$CI = aZ_{30} + bZ_{90} + cM_{30} \quad (1)$$

式中: a 、 b 分别为近 30 d 和 90 d 标准化降水系数,均取 0.4; c 为近 30 d 相对湿润度系数,取 0.8; M_{30} 为近 30 d 的相对湿润度指数 M 值; Z_{30} 、 Z_{90} 分别为近 30 d、近 90 d 的标准化降水指数 SPI 值。

CI 是 SPI 和 M 的算术组合,理论上既考虑了月尺度和季尺度的降水量气候异常,又反映了月尺度水分亏缺,从而可以更好地反映南北过渡带的干旱情况。

利用计算得到的各站点逐月综合气象干旱指数 CI 值,根据气象干旱等级划分标准对 CI 值进行干旱等级划分,然后进行不同等级干旱的分析评估。

根据 CI 值的不同常将干旱划分为 5 种不同的干旱类型,分别为:当 $CI > -0.6$ 时为无旱;当 $-1.2 < CI \leq -0.6$ 时为轻旱;当 $-1.8 < CI \leq -1.2$ 时为中旱;当 $-2.4 < CI \leq -1.8$ 时为重旱;当 $CI \leq -2.4$ 时为特旱。

2.2.2 累积距平法

累积距平法^[28]是由曲线直观判断离散数据点变化趋势的一种非线性统计方法:对于序列 x ,其在某一时刻 t 的累积距平表示为

$$\hat{X}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad t=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。

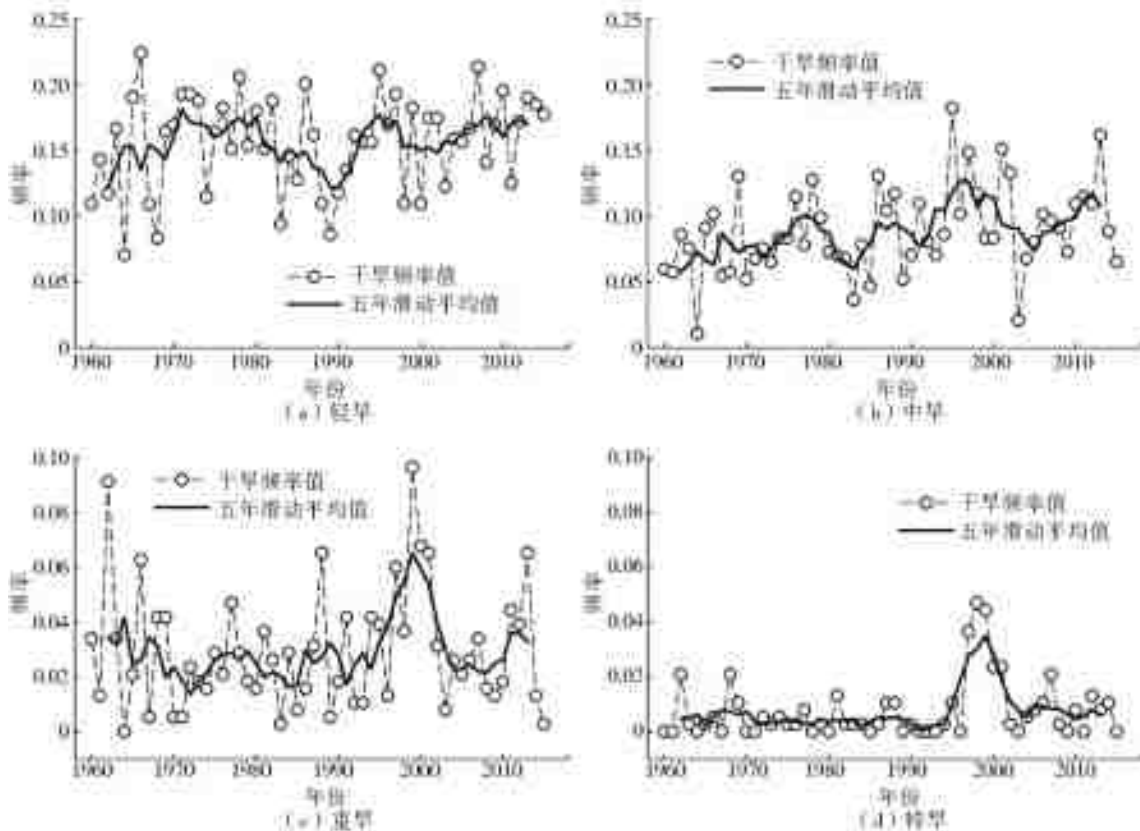


图2 轻旱频率变化(a)、中旱频率变化(b)、重旱频率变化(c)、特旱频率变化(d)

Fig.2 Light drought frequency variation (a), moderate drought frequency variation (b), heavy drought frequency variation (c), extreme drought frequency variation (d)

通过图3所示干旱频率累积距平值分析突变年份,轻旱发生突变的年份为1968、1982年和1998年左右,即1968年前后轻旱发生频率出现下降趋势,1982年为出现显著下降趋势的突变年份,1998年以后整体趋势上升但不显著。中旱于1995年干旱频率达到最大,随后出现下降趋势。重旱的突变点出现在1992年和2000年前后,重旱频率在1992年开始增加,2000年前后开始下降。特旱与重旱类似,均在2000年前后出现了短暂的上升趋势。

3 结果分析

3.1 干旱年尺度变化

3.1.1 干旱频率的年尺度变化

本研究统计了中国南北过渡带1960—2015年56年不同等级干旱的发生频率,对该地区干旱的年度变化特征进行分析。由图2可知,干旱发生频率的大小为轻旱>中旱>重旱>特旱,轻旱在所有干旱类型中占比55.6%。在1960—2015年,中旱频率呈显著上升趋势($P < 0.05$),其余干旱类型的频率虽均呈上升趋势,但趋势并不显著。另外,所有干旱类型的发生频率在20世纪90年代均大幅上升。

3.1.2 干旱强度、干旱历时的年尺度变化

基于游程理论确定的干旱强度用来表示干旱的严重程度,为该次干旱事件中CI值累加值的相反数(令干旱强度值为正值)。干旱历时表示经历干旱的时长,为干旱事件从开始到结束的时间。由图4可知,干旱强度和干旱历时均呈现微弱的上升趋势,上升趋势率分别为0.0163和0.0259。其中,干旱历时的上升趋势更为显著。就干旱强度而言,南北过渡带近56年来的干旱强度变化值在0~8.11波动,最为干旱的年代为20世纪90年代,20世纪

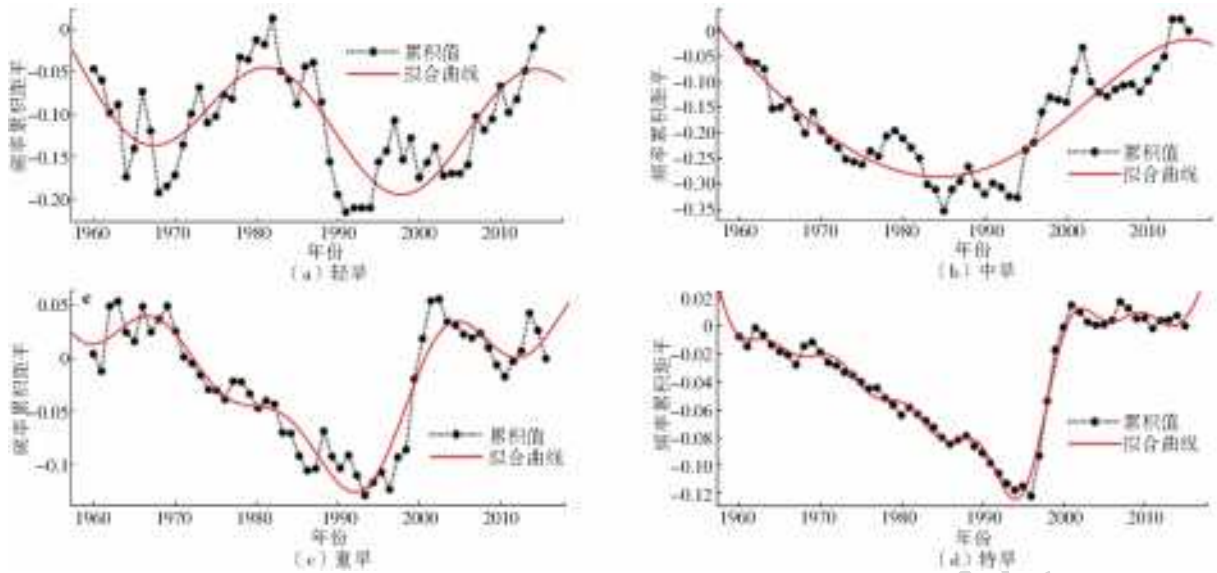


图 3 轻旱频率累积距平(a)、中旱频率累积距平(b)、重旱频率累积距平(c)、特旱频率累积距平(d)
 Fig. 3 Accumulated anomalies of light and dry frequencies (a), cumulative anomalies of moderate drought frequencies (b), cumulative anomalies of heavy drought frequencies (c), cumulative anomalies of extreme drought frequencies (d)

90 年代以前波动较为平缓(除 1968 年的极值)。就年干旱历时而言,干旱历时的年际变化较为平缓,干旱历时值小于等于 2 个月年份的在所有年份中占比 51.8%,干旱历时大于等于 6 个月的年份占比 5.3%。干旱历时最多为 8 个月,出现在 2001 年。总体而言,南北过渡带表现为微弱的干旱化趋势。

0.091,年代春旱的频率在 0.053~0.091 波动,春旱整体呈现上升趋势。春旱的强度高于其他三季,在 20 世纪 60 年代到达春旱的最大值。春旱历时较长。其中,1962、1968、2000 及 2001 年的春旱历时都为 3 个月,为春旱历时最大值。

3.2.2 夏旱

在所有季节中夏季干旱最容易发生,且发生最多的年代为 10 年代,但夏旱的强度值相对来说较小,除 1968 年的夏旱以外,其他年份的夏旱值均小于 3。另外,63%的夏旱历时都为一个月,20 世纪 90 年代和 21 世纪 00 年代的夏旱历时时间最长。

3.2.3 秋旱

秋旱的发生频率总体呈现出先增大后减小的趋势,在 20 世纪 90 年代达到最大值,另外,20 世纪 90 年代的秋旱强度值也较大,仅次于 21 世纪 00 年代。总体而言,秋季干旱的历时值最长,研究的 56 年内,共有 23 年发生秋旱。

3.2.4 冬旱

冬旱的整体发生频率与春旱相等。其中,21 世纪 10 年代的冬旱发生频率最大,为 0.104,除此以外其他年代的冬旱值均在 0.058~0.067 小幅波动。冬季干旱强度的最大值出现在 20 世纪 60 年代,其次为 20 世纪 90 年代,并且冬旱强度在 1999 年出现最大值,为 3.67。冬季干旱的历时值相对而言最短。

3.3 干旱的空间变化特征

对比南北过渡带干旱频率、强度和历时空间分布图(图5)可知,该地区北部的干旱频率、干旱强度

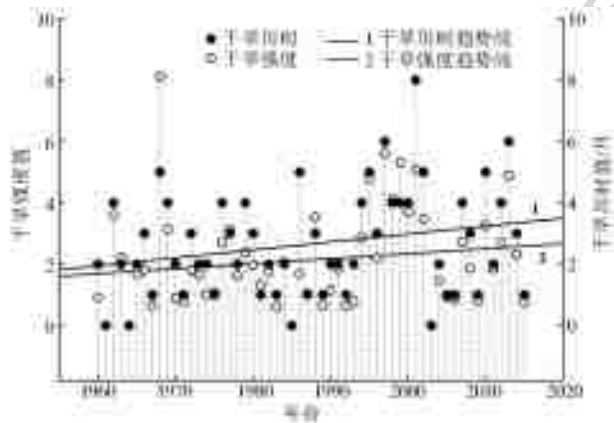


图 4 干旱强度、干旱历时年际变化

Fig. 4 Drought intensity, drought duration, interannual variations

3.2 干旱的季节尺度变化

为揭示南北过渡带季节性干旱变化特征,将研究时间按年代、按季节划分为不同的时段,计算不同年代不同季节的干旱频率、干旱强度和干旱历时情况,在季节划分上,以 3—5 月为春季,其后每 3 月为 1 个季节,冬季为当年 12 月到次年 2 月并计入当年冬季进行统计。如 1969 年 12 月到 1970 年 2 月,为 1969 年冬季。统计结果见表 1。

3.2.1 春旱

春旱发生频率在 21 世纪 00 年代最高,为

表 1 干旱季节变化分析
Tab. 1 Seasonal change analysis

时段	干旱频率				干旱强度				干旱历时/月			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
1960—1969 年	0.059	0.086	0.037	0.058	2.252	1.788	0.362	1.445	2.000	1.667	1.000	1.500
1970—1979 年	0.053	0.086	0.066	0.059	0.830	0.756	0.932	0.899	1.000	1.333	1.333	1.000
1980—1989 年	0.070	0.046	0.050	0.067	1.114	1.013	0.773	0.864	1.333	1.667	1.000	1.000
1990—1999 年	0.061	0.072	0.105	0.065	1.309	1.396	1.605	1.403	1.500	1.750	1.875	1.250
2000—2009 年	0.091	0.073	0.072	0.058	1.539	0.952	1.947	0.683	1.833	1.750	2.667	1.000
2010—2015 年	0.077	0.089	0.067	0.104	1.470	0.804	1.398	1.340	2.000	1.000	2.000	1.750
整体	0.068	0.075	0.066	0.068	1.419	1.118	1.170	1.106	1.611	1.528	1.646	1.250

和干旱历时值大多大于南部,整体呈现出北部干旱南部湿润的空间分布特征。研究区内干旱频率最大和干旱历时最长的三个地区同样都为:武都、郑州和三门峡,而强度最高的为镇安、武都和郑州。由此表明,武都地区干旱情况最为严重,其干

旱频率和干旱历时值都达到了最大,而其干旱强度值也为第二大,仅次于陕西省镇安地区的强度值。不仅如此,对比武都附近地区的干旱状况可知,其西部比东部湿润,而甘肃省东南部则是整个研究区最为湿润的区域。

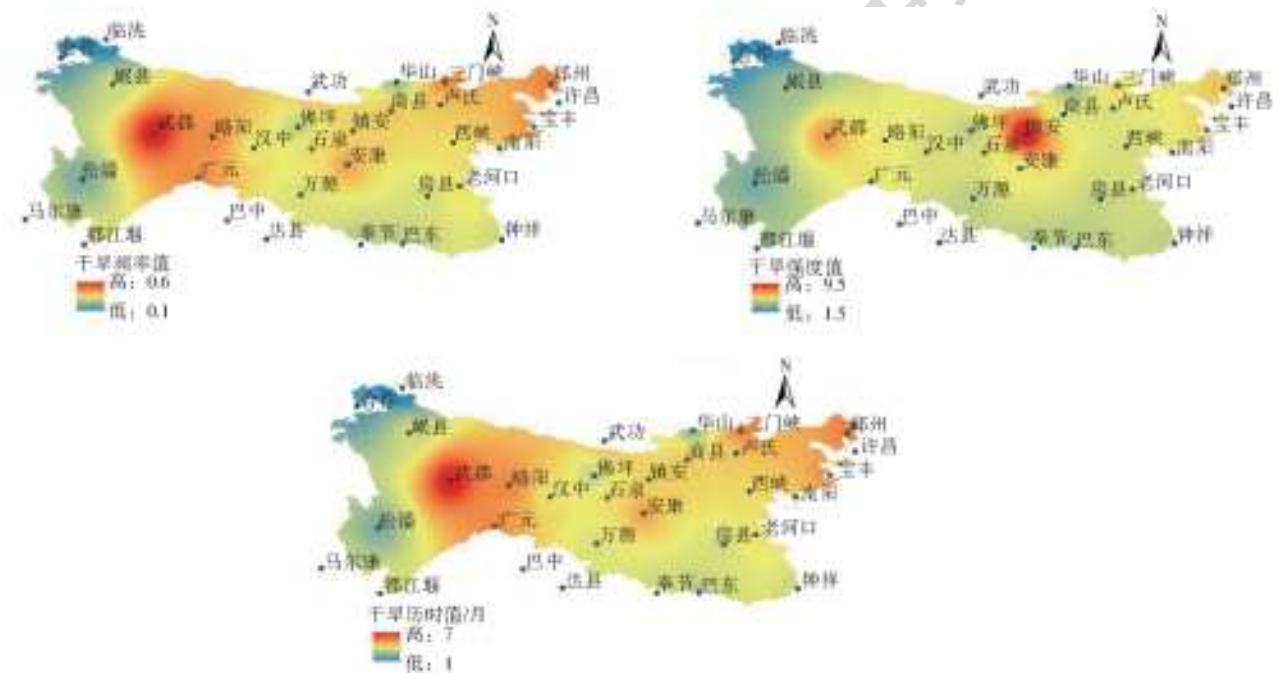


图 5 干旱空间变化

Fig. 5 Spatial map of drought change

4 讨论

通常认为,我国的北部地区较为干旱,南部地区较为湿润,尤其是西北地区,地处内陆腹地,生态基础脆弱^[29],降水较少,使其成为我国干旱最为严重的地区。根据上述研究结果,中国南北过渡带内的西北地区(即甘肃省东南部)反而是南北过渡带内最为湿润的地区。并且根据武都周围的干旱情况及其本身的干旱状态,得出武都为南北过渡带的一个干旱易发区。肖志强等^[30-31]研究发现,武都地区干旱危险性最高,其早年几率为 87%,干旱危险性由武

都地区向四周递减。该结论与研究所得的武都地区干旱特征一致。还有学者得出,甘南高原地区地势高,雨量充沛,较为湿润^[32];并且随着气候变化,南北方的干旱特征发生了改变,北方干旱的同时,南方干旱变得更加明显^[33],这两点很好的佐证了甘肃南部最为湿润的原因。这些新的认识对中国南北过渡带干旱的风险规避具有重要的参考意义。但是干旱的空间分布与王兆礼等对该地区的研究结果^[34]相比略有不同,可能是受制于气象站点数量等因素,在后续研究中,建议增加站点数量并考虑地形等因素,更深入的研究干旱在该地区的过渡特征。

5 结 论

本文对南北过渡带 56 年的干旱情况进行分析,结果表明:(1)不同等级干旱发生频率均呈上升趋势,其中轻旱发生的频率最大,其干旱发生频率的均值为 0.15;中早上升趋势显著($P < 0.05$)。干旱的发生频率在 20 世纪 90 年代中后期达到了最大值,与干旱强度和干旱历时的最大值发生时期相同,另外,干旱强度和干旱历时也呈缓慢上升趋势,并且干旱历时的上升趋势更为明显。(2)干旱的发生具有季节性规律,夏季最容易发生干旱,而干旱强度在春季最强,且在秋季拥有最长干旱历时。(3)南北过渡带的干旱情况在空间分布上呈现出明显的差异性特征,研究区内的北部地区相对干旱,南部地区相对湿润,并且甘肃省的武都地区为干旱频率、干旱历时和干旱强度的高值区域,应引起治理的高度重视,陕西省的镇安地区及研究区内的河南省同样为干旱的着重治理地区。

参考文献(References):

- [1] 任立良,沈鸿仁,袁飞,等.变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析[J].水科学进展,2016,27(4):492-500. (REN L L, SHEN H R, YUAN F, et al. Analysis on the characteristics of hydrological drought evolution in the Weihe River basin under changing environment [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 492-500. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.04.002.
- [2] 严登华,袁喆,杨志勇,等.1961年以来海河流域干旱时空变化特征分析[J].水科学进展,2013,24(1):34-41. (YAN D H, YUAN Z, YANG Z Y, et al. Temporal and spatial variation characteristics of drought in Haihe River basin since 1961. [J]. Advances in water science, 2013, 24(1): 34-41. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2013.01.020.
- [3] SHI B L, ZHU X Y, HU Y C, et al. Drought characteristics of Henan province in 1961-2013 based on standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, (27): 325. (in Chinese) DOI: 10.1007/s11442-017-1378-4.
- [4] 余慧倩,张强,孙鹏,等.干旱强度及发生时间对华北平原五省冬小麦产量影响[J].地理学报,2019,74(1):87-102. (YU H Q, ZHANG Q, SUN P, et al. Effects of drought intensity and occurrence time on winter wheat yield in five provinces of North China Plain [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 74(1): 87-102. (in Chinese))
- [5] 余国安,李志威,黄河清,等.人类活动影响下的干旱区河流地貌演变——以塔里木河为例[J].水科学进展, 2017, 28(2): 183-192. (YU G A, LI Z W, HUANG H Q, et al. Evolution of river geomorphology in arid regions under the influence of human activities: A case study of the Tarim River [J]. Advances in water science, 2017, 28(2): 183-192. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.02.003.
- [6] 刘维,李祎君,何亮,等.基于 SPI 判定的东北春玉米生长季干旱对产量的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):121-127. (LIU W, LI Y J, HE L, et al. Effect of drought on yield in northeast spring maize growing season based on SPI [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34(22): 121-127. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; NYGU. 0. 2018-22-015.
- [7] 金菊良,郦建强,周玉良,等.旱灾风险评估的初步理论框架[J].灾害学,2014,29(3):1-10. (JIN J L, YAN J Q, ZHOU Y L, et al. Preliminary theoretical framework of drought risk assessment [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3): 1-10. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.03.001.
- [8] 金菊良,宋占智,崔毅,等.旱灾风险评估与调控关键技术研究进展[J].水利学报,2016,47(3):398-412. (JIN J L, SONG Z Z, CUI Y, et al. Research progress on key technologies for drought risk assessment and regulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 398-412. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150945.
- [9] 刘可晶,王文,朱焯,等.淮河流域过去 60 年干旱趋势特征及其与极端降水的联系[J].水利学报,2012,43(10):1179-1187. (LIU K J, WANG W, ZHU Y, et al. Characteristics of drought trends in the Huaihe River basin over the past 60 years and their links to extreme precipitation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(10): 1179-1187. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2012.10.001.
- [10] ZHANG J, SHI Y J. Spatio-temporal variations in extreme drought in China during 1961-2015 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(1): 67-83. (in Chinese)
- [11] BLAUHUT V, GUDMUNDSSON L, STAHL K. Towards pan-European drought risk maps: quantifying the link between drought indices and reported drought impacts [J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(1): 014008. DOI: 10.1088/1748-9326/10/1/014008.
- [12] STAGGE J H, KOHN I, TALLAKSEN L M, et al. Modeling drought impact occurrence based on climatological drought indices for Europe [C]// Agu Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts, 2014.
- [13] GAO Y, MARKKANEN T, THUM T, et al. Assessing various drought indicators in representing drought in boreal forests in Finland [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 12(8): 8091-8129. DOI: 10.

- 5194/hess-20-175-2016.
- [14] Meze-Hausken, E. Contrasting climate variability and meteorological drought with perceived drought and climate change in northern Ethiopia [J]. *Climate Research*, 2004, 27(1): 19-31. DOI: 10. 3354/cr027019.
- [15] University L, Lanzhou, Beijing, et al. The decadal variability and its cause of the extreme drought in china [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(6): 3932-3940.
- [16] ZOU X K, ZHAI P M, ZHANG Q. Variations in droughts over China: 1951-2003 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(4): 353-368. DOI: 10. 1029/2004GL021853.
- [17] XIN X G, YU R C, ZHOU T J, et al. Drought in late spring of south China in recent decades [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(13): 3197-3206. DOI: 10. 1175/JCLI3794. 1
- [18] 张强, 韩兰英, 张立阳, 等. 论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略 [J]. *地球科学进展*, 2014, 29(1): 80-91. (ZHANG Q, HAN L Y, ZHANG L Y, et al. On the risk characteristics and management strategies of drought and drought disasters under the background of climate warming [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2014, 29(1): 80-91. (in Chinese)) DOI: 10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2014. 01. 0080.
- [19] 邓振镛, 倾继祖, 黄蕾诺, 等. 干旱对农业危害的特点及其减灾技术 [J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(32): 16177-16179. (DENG Z W, QING J Z, HUANG L N, et al. Characteristics of drought on agricultural hazards and their disaster mitigation techniques [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(32): 16177-16179. (in Chinese)) DOI: 10. 13989/j. cnki. 0517-6611. 2009. 32. 061.
- [20] 祁靓雯, 钱会, 高盼盼. 可利用降雨量 Z 指数法的西安市气象干旱特征 [J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(2): 93-98, 124. (QI L W, QIAN H, GAO P P. Meteorological drought characteristics of Xi'an City using rainfall Z index method [J]. *South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology*, 2016, 14(2): 93-98, 124. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 02. 017.
- [21] 范嘉泉, 郑剑非. 帕尔默气象干旱研究方法介绍 [J]. *气象科技*, 1984(1): 63-70. (FAN J Q, ZHENG J F. Introduction to Palmer meteorological drought research methods [J]. *Meteorological Technology*, 1984(1): 63-70. (in Chinese)) DOI: 10. 19517/j. 1671-6345. 1984. 01. 018.
- [22] 张建龙, 王龙, 杨蕊, 等. 南盘江流域水文干旱对气象干旱的响应特征 [J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(3): 29-32. (ZHANG J L, WANG L, YANG R, et al. Response characteristics of hydrological drought in the Nanpanjiang River basin to meteorological drought [J]. *South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology*, 2014, 12(3): 29-32. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2014. 03. 006.
- [23] 王慧敏, 郝祥云, 朱仲元. 基于综合气象干旱指数的干旱状况分析——以锡林河流域为例 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 326-329, 336. (WANG H M, HAO X Y, ZHU Z Y. Analysis of drought status based on integrated meteorological drought index; Taking Xilin River basin as an example [J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2019, 26(2): 326-329, 336. (in Chinese)) DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2019. 02. 046.
- [24] 历超, 董洋, 阙伟伦. 基于 CI 指数的黑龙江干旱分析及其应用 [J]. *现代化农业*, 2017, (11): 43-45. (LI C, DONG Y, QUE W L. Drought analysis and application of Heilongjiang River based on CI index [J]. *Modern agriculture*, 2017, (11): 43-45. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-0254. 2017. 11. 026.
- [25] 谢清霞, 李刚, 袁晨, 等. 基于 CI 指数的西南地区 1961—2012 年春季干旱分布特征 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2016, 10(4): 53-58. (XIE Q X, LI G, YUAN C, et al. Distribution characteristics of spring drought in southwest China from 1961 to 2012 based on CI index [J]. *Desert and Oasis Weather*, 2016, 10(4): 53-58. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-0799. 2016. 04. 008.
- [26] 张静, 任志远. 秦巴山区土地利用时空格局及地形梯度效应 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14): 250-257. (ZHANG J, REN Z Y. Temporal and spatial patterns of land use and topographic gradient effects in Qinba Mountain Area [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(14): 250-257. (in Chinese)) DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2016. 14. 033.
- [27] 赵世发, 王俊, 杜继稳, 等. 秦巴山区地质灾害成因及预报预警 [J]. *气象科技*, 2010, 38(2): 263-269. (ZHAO S F, WANG J, DU J W, DU J, et al. Causes and forecasting of geological hazards in Qinba Mountain Area [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2010, 38(2): 263-269. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-6345. 2010. 02. 024.
- [28] 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析——累积量斜率变化率比较方法的提出及应用 [J]. *地理学报*, 2012, 67(3): 388-397. (WANG S J, YAN Y X, YAN M, et al. Analysis of the contribution rate of precipitation and human activities to the change of runoff in Huangfuchuan basin; the application and application of the comparison method of the change rate of cumulant slope [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 388-397. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/xb201203010.

(下转第 158 页)

- 问题[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 424-435. (YANG K L. Review and frontier scientific issues of hydraulic control for long distance water diversion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 424-435. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20150824.
- [16] 杨开林. 现代调水工程的水力控制理论[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 1-7. (YANG K L. Theory of hydraulic control for modern water diversion projects [J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2011, 9(4): 1-7. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1201.2011.04001.
- [17] 陶永霞, 丁泽霖, 刘子祺. 活塞消能式调压室可行性研究[J]. 水力发电, 2017, 43(3): 65-67. (TAO Y X, DING Z L, LIU Z Q. Feasibility study of piston energy dissipation surge chamber[J]. Water Power, 2017, 43(3): 65-67. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SLFD.0.2017-03-015.
- [18] 程永光, 陈鉴治, 杨建东, 等. 连接管长度对调压井水位波动和水锤压力的影响[J]. 水利学报, 2003(5): 46-51. (CHENG Y G, CHENG J Z, YANG J D, et al. Influence of lateral pipe length of surge tank on surge wave and water hammer [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(5): 46-51. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2003.05.008.
- [19] 徐逸, 蔡付林, 花玉龙. 带侧弯式连接管阻抗式调压室水力特性模拟[J]. 水电能源科学, 2013, 31(4): 93-95. (XU Y, CAI F L, HUA Y L. Simulation of hydraulic characteristics of impedance surge tanks with side-bending link pipe[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(4): 93-95. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SDNY.0.2013-04-025.
- [20] 蔡付林, 宋长福, 周建旭. 有长连接管调压室水头损失系数计算方法研究[J]. 水利水电科技进展, 2003(6): 27-29, 48. (CAI F L, SONG C F, ZHOU J X. Calculation method of head loss coefficient of long link pipe surge chamber[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003(6): 27-29, 48. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SLSD.0.2003-06-009.
-
- (上接第 85 页)
- [29] 王浩, 秦大庸, 王研, 等. 西北内陆干旱区生态环境及其演变趋势[J]. 水利学报, 2004(8): 8-14. (WANG H, QIN D Y, WANG Y, et al. The ecological environment and its evolution trend in the arid regions of northwest China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(8): 8-14. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0559-9350.2004.08.002.
- [30] 肖志强, 刘丽, 赵彦锋. 武都山区干旱气候特征与灾害风险区划[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(17): 7624-7626, 7734. (XIAO Z Q, LIU L, ZHAO Y F. Arid climate characteristics and disaster risk zoning in Wudu Mountain Area [J]. Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(17): 7624-7626, 7734. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.0517-6611.2013.17.083.
- [31] 金朴, 任三学. 武都干旱气候特征[J]. 甘肃气象, 1998(2): 24-26. (JIN P, REN S X. Drought climate characteristics of Wudu[J]. Gansu weather, 1998(2): 24-26. (in Chinese))
- [32] 庞素菲, 魏伟, 郭泽呈, 等. 基于 TVDI 的甘肃省农业旱情特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1849-1860. (PANG S F, WEI W, GUO Z C, et al. Characteristics of agricultural drought in Gansu Province based on TVDI and its influencing factors [J]. Journal of ecology, 2019, 38(6): 1849-1860. (in Chinese)) DOI:10.13292/j.1000-4890.201906.035.
- [33] 韩兰英, 张强, 贾建英, 等. 气候变暖背景下中国干旱强度、频次和持续时间及其南北差异性[J]. 中国沙漠, 2019(5): 1-10. (HAN L Y, ZHANG Q, JIA J Y, et al. China's drought intensity, frequency and duration and its north-south differences in the context of climate warming [J]. Chinese desert, 2019(5): 1-10. (in Chinese))
- [34] 王兆礼, 黄泽勤, 李军, 等. 基于 SPEI 和 NDVI 的中国流域尺度气象干旱及植被分布时空演变[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 177-186. (WANG Z L, HUANG Z Q, LI J, et al. Temporal and spatial evolution of meteorological drought and vegetation distribution in China basin based on SPEI and NDVI [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2016, 32(14): 177-186. (in Chinese)) DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.14.0187.