

基于 SPEI 的鲁中山区 1958—2015 年干旱特征分析

燕婷婷¹, 朱清科¹, 赵维军^{2*}

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 泰山学院 旅游学院, 山东 泰安 271000)

摘要:利用鲁中山区 8 个气象站点 1958—2015 年的月值气象数据, 计算标准化降水蒸散指数 (SPEI) 并进行统计分析, 探讨鲁中山区近 58 a 干旱特征、干旱程度与频率和干旱的持续性。结果表明, 1) 1958—2015 年鲁中山区年均气温呈显著增加趋势, 其中春、秋、冬 3 季的气温增加最为显著; 而年均降水量有下降趋势, 但趋势不明显; 2) 鲁中山区自 20 世纪 90 年代后干旱趋于严重, 最严重的年份分别是 1988、2014、2001、1981 年及 2013 年, 严重干旱在近期呈现连续性。极端干旱的高频期则是 1998—2007 年, 此后干旱频率与严重、极端干旱频率均有下降趋势; 3) 鲁中山区在 10 a 时间尺度内, 干旱持续最长时间基本稳定在 3~7 个月内, 而平均干旱持续时间则表现为季节尺度的平均干旱持续时间增长, 而年际尺度的则减小。

关键词: 干旱; SPEI; 鲁中山区

中图分类号: S761.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2017)06-0162-07

Drought Characteristics of the Middle Mountainous Area of Shandong Based on SPEI during 1958—2015

YAN Ting-ting¹, ZHU Qing-ke¹, ZHAO Wei-jun^{2*}

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. School of Tourism, Taishan University, Taian, Shandong 271000, China)

Abstract: The variations of drought frequency and duration during 1958—2015 in the middle mountainous area of Shandong were analyzed and explored based on SPEI. The results indicated that 1) annual average temperatures significantly increased, and there was the most significant increase in spring, fall and winter, while the average annual precipitation decreased insignificantly. 2) Since the 1990s, drought tended to be more severe, and the most severe years were 1988, 2014, 2001, 1981, and 2013. The frequency of extreme drought period was the longest during 1998—2007, then the drought frequency and serious, extreme drought frequency displayed decrease trend. 3) The longest drought duration was from 3 to 7 months in the 10-year scale. Moreover, the mean drought duration of season scale increased, while that of annual scale reduced.

Key words: drought; SPEI; Shandong middle mountainous area

全球变暖及人类活动的影响使得干旱化问题越来越受到广泛关注^[1]。鲁中山区多为石灰岩丘陵山地, 土地贫瘠, 干旱缺水, 水土流失严重, 鲁中山区的气候干旱加剧了鲁中山区土壤干旱的进程, 严重制约着鲁中山区的土地生产力^[2-3], 给当地的农林生

产、生态环境治理以及水资源管理等方面带来诸多不利影响^[4-5]。因此, 鲁中山区干旱特征的研究具有重要意义。20 世纪以来, 国际上提出了许多干旱量化研究方法^[6], 主要有 PDSI 指数、SPI 指数、SPEI 指数(标准化降水蒸散指数, standardized precipita-

收稿日期: 2016-11-22 修回日期: 2017-07-05

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2014DL002); 泰山学院引进人才科研启动基金(Y-01-2014019)。

作者简介: 燕婷婷, 女, 硕士, 助教, 研究方向: 生态环境地理与区域规划。E-mail: yanting1129@126.com

* 通信作者: 赵维军, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 生态恢复与水土保持。E-mail: zwj_0920@126.com

tion-evapotranspiration index) 等^[7-12]。PDSI 指数是基于地表水分平衡原理的干湿指标, 适用于干旱半干旱地区, 有效地解决了区域干旱监测、预报难题, 但是缺乏时空比较的有效性^[13-14]、旱情等级划分较为主观^[10]。SPI 指数主要考虑降水因素, 计算简单且能够较好地反映干旱的持续时间和强度, 忽略了水分平衡的影响^[15]。S. M. Vicente-Serrano 于 2010 年在 SPI 基础上提出标准化降水蒸散指数^[15-16], 通过降水和蒸散量来反映干旱的程度, 综合了 PDSI 和 SPI 的优势^[17], 是全球变暖背景下研究干旱的新的理想指数^[11]。近年来, SPEI 指数被许多专家和学者用来研究的变化特征, 区域研究有黄淮海平原^[8]、西北地区^[11]、东北地区^[18]、华南地区^[19]等; 省域研究区域有北京市^[9]、贵州省^[10]、青海省^[20]、甘肃省^[21]、新疆自治区^[22]、河北省^[23]、河南省^[24]等; 跨市域研究区域有陇东地区^[12]、陕北地区^[25]等; 市域研究有临沂^[7]、太原^[26]等。而对鲁中山区的干旱研究鲜有报道。本研究利用 SPEI 指数研究鲁中山区的气候干旱特征及规律, 以为鲁中山区提供干旱预警。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鲁中山区位于山东省中部, 主要分布在济南、临沂、泰安及淄博等市内, 主要由泰、沂山脉及其所属的低山、丘陵和局部的冲击平原组成, 属于省内地势最高、山地分布最集中的区域^[27]。本区气候属暖温带半湿润大陆性气候, 年平均气温 12.0~14.5℃, 极端最低温为-18~-14℃, ≥4℃ 积温 4 100~4 600℃。年降水量为 700~900 mm, 雨量多集中在 6—9 月^[28], 占全年降水量 3/4, 山地气候有较为明显的垂直分异现象^[29]。区内土壤以棕壤与褐土为主, 植被为各种落叶阔叶林和温性针叶林^[28]。

1.2 数据与方法

1.2.1 数据来源 囿于数据的获取的难度以及区域可代表性, 采用鲁中山区 1958—2015 年逐月平均降水量和平均气温数据, 由其所在的济南、临沂、泰安、淄博市、沂水县、蒙阴县、平邑县、沂源县等 8 个气象站点提供, 主要来源于中国气象数据共享网(图 1)。

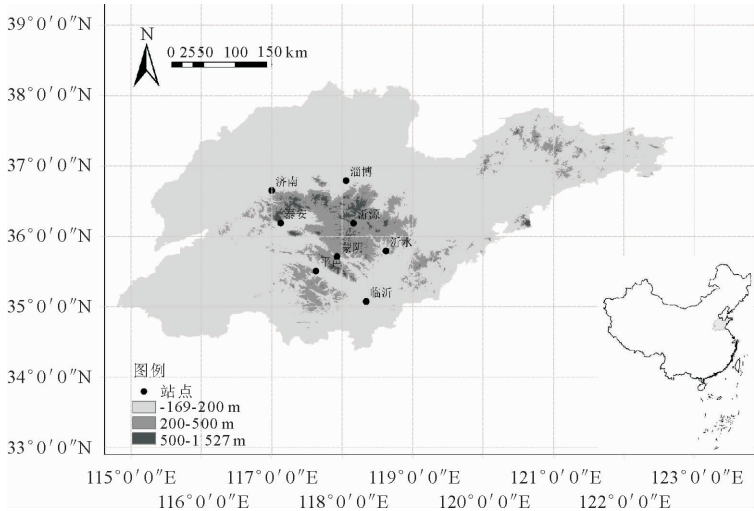


图 1 鲁中山区及气象站点区位图

Fig. 1 Study area and distribution of meteorological stations in the middle mountainous area of Shandong

1.2.2 标准化降水蒸散指数 SPEI 计算方法的原理是用降水量与蒸散量的差值偏离平均状态的程度来表征某地区的干旱程度^[19]。基于 1958—2015 年鲁中山区 8 个气象站点的逐月平均降水量和平均气温数据分别计算不同时间尺度 SPEI(包括相对短期的 1、3 个月与 6 个月和相对长期的 12 个月与 24 个月, 分别用 SPEI-1、SPEI-3、SPEI-6、SPEI-12、SPEI-24 表示)。

根据 SPEI 干旱等级划分标准^[15-16], 如表 1, 将干旱定义为 $SPEI \leq -1$ 。

表 1 SPEI 干旱等级划分

Table 1 Drought degrees based on standardized precipitation evapotranspiration index(SPEI)

干旱等级	SPEI	干旱等级	SPEI
极端湿润	≥ 2.0	中度干旱	-1.0~-1.49
非常湿润	1.5~1.99	严重干旱	-1.5~-1.99
中度湿润	1.0~1.49	极端干旱	≤ -2
正常	-0.99~0.99		

1.2.3 Mann-Kendall 趋势检验 统计方法包括参数和非参数的检验方法, 已被广泛应用于时间序列

的趋势检验,且 Mann-Kendall 趋势检验已被广泛应用于水文学和气象学中随机数据的趋势检验^[30],本研究应用 Mann-Kendall 趋势检验方法分析气温和降水的趋势^[31-33]。

统计量用 S 表示可以用如下公式计算获得:

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^nsgn(x_j-x_i) \tag{1}$$

式中 n 表示样本的数量, x_i 和 x_j 分别表示时间序列中的第 i 和 j ($j>i$) 个数据值,同时 $sgn(x_j-x_i)$ 是符号函数,由以下公式确定:

$$sgn(x_j-x_i)=\begin{cases} +1, & if\,x_j-x_i>0 \\ 0, & if\,x_j-x_i=0 \\ -1, & if\,x_j-x_i<0 \end{cases} \tag{2}$$

本研究所选取的数据均为实测值,方差的具体计算公式:

$$\sigma^2(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{3}$$

标准正态检验统计量 Z_s 由以下公式计算:

$$Z_s=\begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\sigma^2(S)}}, & if\,S>0 \\ 0, & if\,S=0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\sigma^2(S)}}, & if\,S<0 \end{cases} \tag{4}$$

显著性水平采用 $P=0.05$ 。如果 Z_s 是正值,即表明该时间序列数据为增加趋势;如果 Z_s 是负值,则表明该时间序列数据为减小趋势。在 5% 的显著性水平上,如果 $|Z_s|>1.96$,则表明无趋势的零假设将被拒绝。

2 结果与分析

2.1 鲁中山区降水与气温统计特征分析

1958—2015 年,鲁中山区的年降水量和年均气温变化特征如图 2 所示。年降水量均值为 753.14

mm,标准差为 170.47 mm,变异系数为 3.00%;年平均气温均值为 13.32℃,标准差为 0.59,变异系数为 1.00%。对年均降水量和年平均气温进行 M-K 趋势检验,年均降水量呈下降趋势,但下降趋势不显著,而年平均气温呈现逐年稳定上升的趋势,且年均气温上升的趋势极为显著。

为进一步研究鲁中山区气候的四季变化特征,分别对 8 个代表站点的降水、气温数据进行春、夏、秋、冬的统计分析(图 3、表 2)。1958—2015 年期间鲁中山区的降水季节分配不均,年际差异明显,且四季降水量的变化与气温变化存在响应关系,同时,夏、秋季节的平均降水量呈现不同程度的降低趋势,春、冬季则出现增加趋势。1958—2015 年鲁中山区四季平均气温均呈现不同程度的增加趋势,春秋冬三季的气温增加最为显著,夏季虽有增加趋势但并不显著。

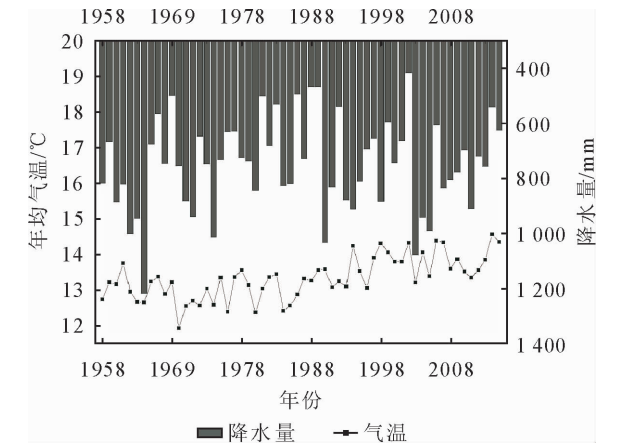


图 2 1958—2015 年鲁中山区年降水量和年均气温变化特征

Fig. 2 Features of annual precipitation and average annual temperature in the middle mountainous area of Shandong during 1958—2015

表 2 1958—2015 年鲁中山区年、季节降水量和气温统计特征

Table 2 Characteristics of annual precipitation,seasonal precipitation and temperature in the middle mountainous area of Shandong during 1958—2015

指标	时间尺度	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	MK-Z
平均降水量/mm	年	418.70	1218.46	753.14±22.38	170.47	3.00	−0.83
	春	28.17	214.13	110.23±5.35	40.77	5.00	0.64
	夏	195.51	769.79	482.77±17.82	135.68	4.00	−0.90
	秋	24.00	322.16	130.53±8.78	66.89	7.00	−0.51
	冬	0.67	71.96	29.60±2.08	15.81	7.00	0.04
平均气温/℃	年	11.92	14.55	13.32±0.08	0.59	1.00	5.14*
	春	12.09	16.64	13.77±0.12	0.95	1.00	4.53*
	夏	23.87	26.61	25.37±0.08	0.61	0.00	1.01
	秋	12.95	16.46	14.22±0.09	0.71	1.00	3.98*
	冬	3.30	2.55	0.07±0.15	1.17	−234.00	4.12*

注: * 表示 Mann-Kendall 趋势变化显著。

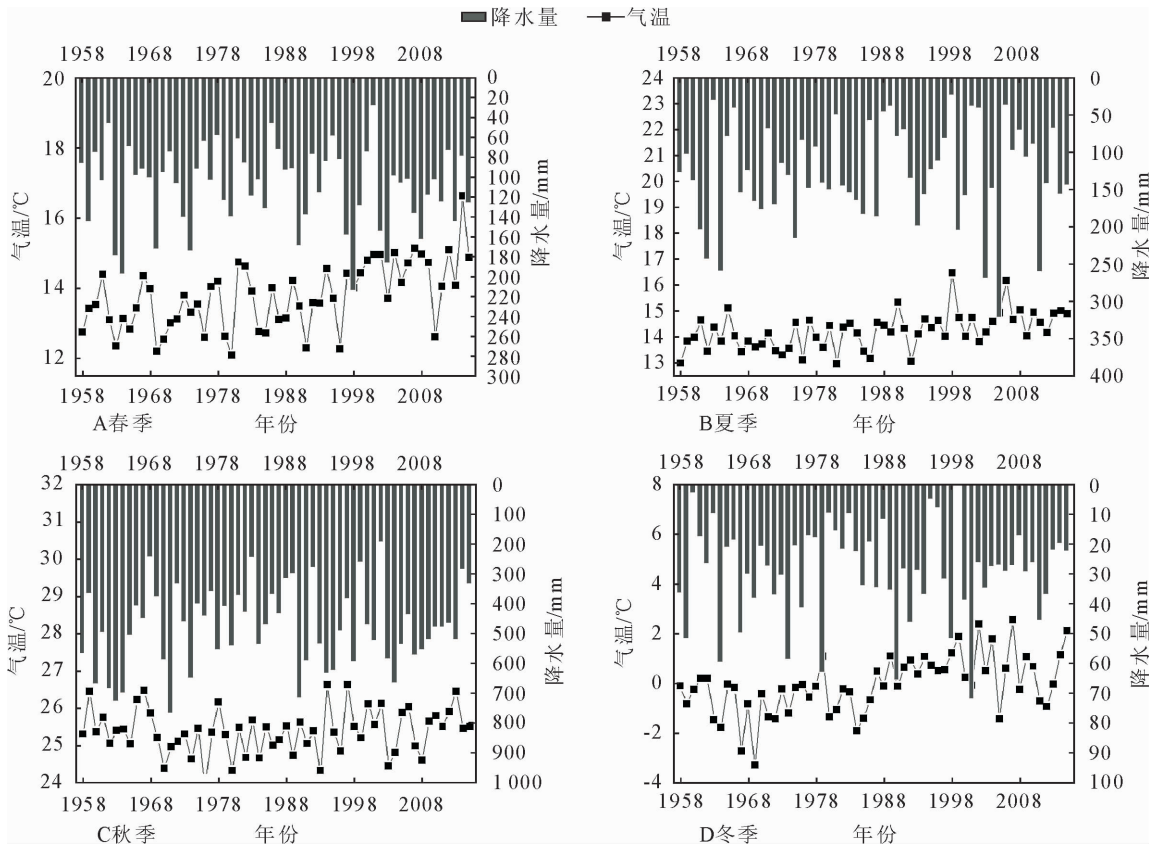


图 3 1958—2015 年鲁中山区四季降水量和气温变化特征

Fig. 3 Seasonal features of the precipitation and temperature in the middle mountainous area of Shandong during 1958—2015

2.2 基于 SPEI 的鲁中山区干旱特征分析

2.2.1 基于 SPEI 的不同时间尺度的干旱特征分析 不同时间尺度的 SPEI 值可反映研究区的干湿演变状况,SPEI-1 主要受每月温度和水分变化的影响,可较为准确的反映土壤含水量的高低,对于农业发展具有重要意义^[17]。SPEI-3 和 SPEI-12 则受到季度、年际气温和降水的影响,较好的反映了土壤下层含水量。

鲁中山区不同时间尺度(1、3、6、12 个月及 24 个月)的 SPEI (图 4)可知,不同时间尺度干旱期和湿润期的持续时间差异显著,短时间尺度(1、3 个月及 6 个月)的 SPEI 值显示了研究期间的高频度干湿时期交替。由 SPEI-12 可知,1958—2015 年鲁中山区主要的干旱时期为 20 世纪 60 年代中期,80、90 年代末至 21 世纪初期、2010 年代中期。根据 SPEI-12,干旱最严重的 5 个年份分别是 1988 年(−1.53)、2014 年(−1.36)2001 年(−1.34)、1981 年(−1.19)、2013 年(−0.99)。整体而言,1958—2015 年鲁中山区的干湿交替的特征在长时间尺度内可清晰显示,且与短时间尺度内 SPEI 的显示结果较为一致。

2.2.2 鲁中山区干旱程度及频率分析 鲁中山区干旱频率最高的年代是 1978—2007 年,同时出现极端干旱的高频率期在 1998—2007 年,此后干旱频率

与严重、极端干旱频率均有下降趋势(图 5)。

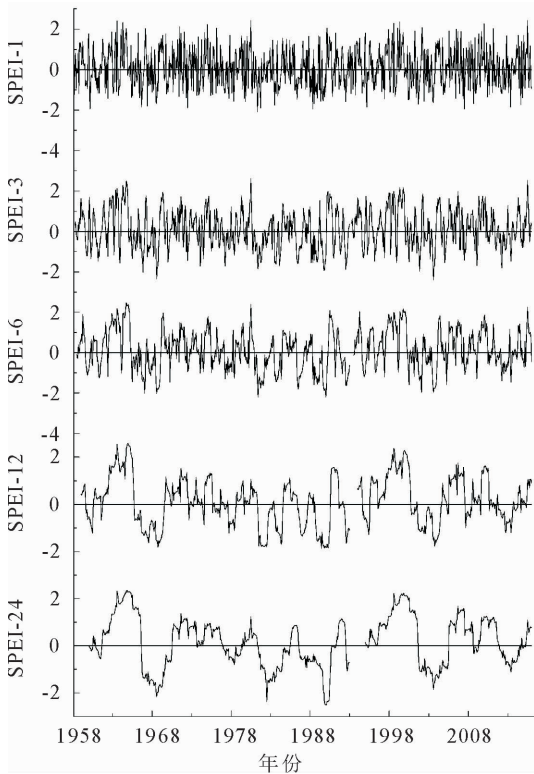


图 4 鲁中山区不同时间尺度的标准化降水蒸散指数

Fig. 4 Standardized precipitation–evapotranspiration index of different time scales in the middle mountainous area of Shandong

3 个月尺度的 SPEI 值分析表明,鲁中山区干旱

频率在经过 1998—2007 年的高峰期后呈逐渐降低的趋势,说明干旱的季节变化与年际变化幅度逐渐减小,而中度干旱和严重干旱趋于稳定,但是极端干旱在经过 1998—2007 年频发后出现降低的趋势。12 个月尺度的 SPEI 值分析,干旱频发高峰期在 1978—1987 年,中度干旱发生频率有减小趋势,严重干旱在经过 1978—1987 年高频期后出现下降趋势,极端干旱最高频率出现在 1998—2007 年,之后极端干旱频率有下降趋势。

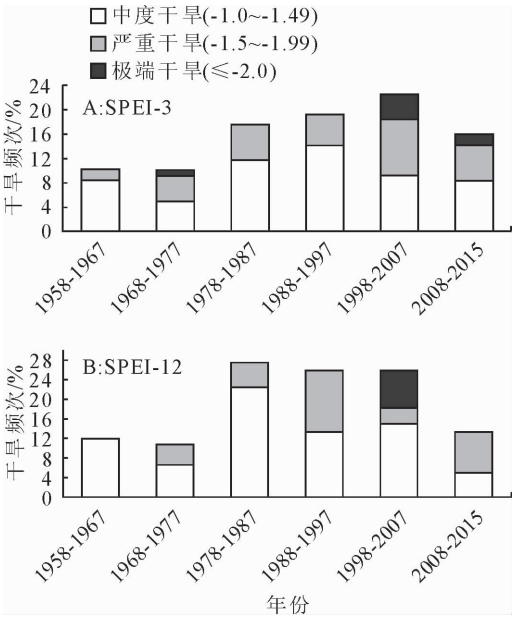


图 5 1958—2015 年鲁中山区干旱频率

Fig. 5 Frequency of drought in the middle mountainous area of Shandong during 1958—2015

2.2.3 不同年代干旱持续特征 SPEI-3 显示(图 6)最长持续时间达 5 个月,发生在 1988—2007 年(1988、1989 年、2002 年);而其他 10 a 尺度时间内最长持续干旱时间分别为 4 个月(1968—1977 年和 1978—1987 年)、3 个月(1958—1967 年和 2008—2015 年)。因此,鲁中山区的 SPEI-3 在 10 a 尺度上干旱最长持续时间趋于平稳,保持在 3~5 个月。能够反映年际干旱特征的 SPEI-12 在 10 a 时间尺度内干旱最长持续时间基本稳定在 5~7 个月,最长持续时间达 12 个月,发生在 1988—1997 年。

鲁中山区 SPEI-3 的干旱平均持续时间(月)的年际变化呈现波动上升趋势(图 7),平均持续时间最长达 2.1 月每次(1988—1997 年),此后出现下降后又有所回升;根据 SPEI-12 的干旱平均持续时间(月)的年际变化呈现波动下降趋势,最长平均持续时间也发生在 1988—1997 年,每次达 3.3 月,此后呈波动下降趋势。

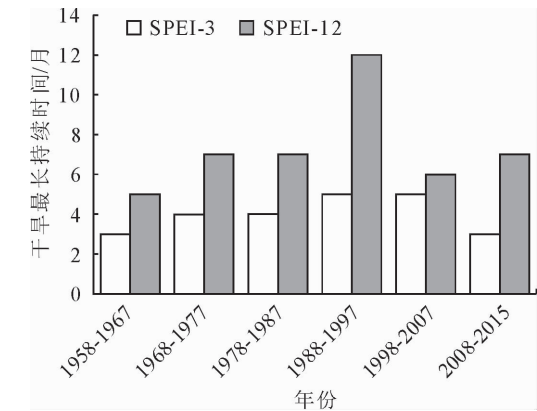


图 6 1958—2015 年鲁中山区最长干旱持续时间

Fig. 6 Maximum drought duration in the middle mountainous area of Shandong during 1958—2015

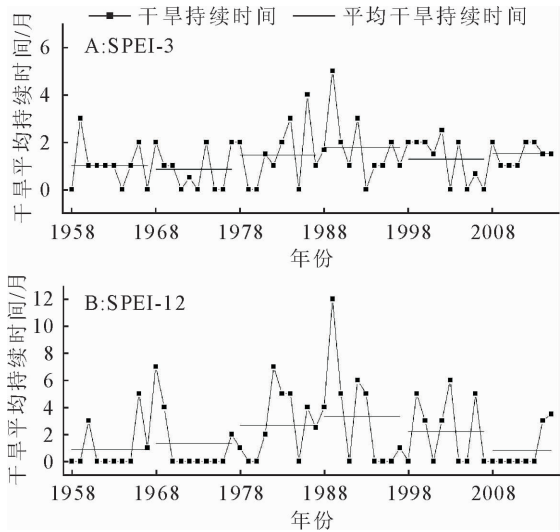


图 7 1958—2015 年鲁中山区干旱平均持续时间

Fig. 7 Mean drought duration in the middle mountainous area of Shandong during 1958—2015

3 结论与讨论

鲁中山区是山东省干旱瘠薄山地进行生态修复的重要区域^[34],对土壤水分的要求较大,而降水与气温等气候因素严重影响着土壤水分含量。而鲁中山区在近 58 a 年均气温显著增加、降水出现下降趋势,尤其是秋冬季的气温增加与降水减少加重了该区的气候干旱,2010—2011 年出现秋冬季的连续干旱事件^[35],进而影响瘠薄山地土壤的干旱程度。此外,鲁中山区的气温升高、增暖的趋势与张玉静^[36]的研究一致,同时,20 世纪 80 年代后,受旱率增加明显,且中等及中等以上程度的干旱灾害发生频率也明显加快^[37],此阶段山东省的旱灾有明显的加重趋势,鲁中南地区受灾最为严重(济南、泰安、临沂)^[38]。主要原因可能是降水异常,大气环流加剧了地区干旱,同时厄尔尼诺现象促使夏季干旱^[39]。

气候的干旱趋势制约鲁中山区的林业生产力、破坏森林生态系统^[40],同时各类森林灾害频繁发生,森林灾害的风险上升,降低生长量和增加树木胁迫程度和死亡率^[41-43],促使森林害虫和病原菌发生等、损失加重^[44]。参阅《山东省环境状况公报》,2005 年后山东省呈现不同程度的连续干旱与森林火灾,干旱区域大多集中于鲁中山区、鲁南、半岛南部地区;单位火灾受害面积 2011 年火灾最为严重,其次为 2013 年、2014 年。由于森林火灾除干旱原因外还与风力、人为等很多因素密切相关,与本研究所得干旱年份(2013 年与 2014 年)基本吻合。鲁中山区近 58 a 干旱发生特征的识别中较好的体现了干旱对气温显著升高的响应^[45]。但影响干旱的因素较多,关于鲁中山区城市间干旱的差异化特征以及成因等相关问题则有待进行进一步的研究。

参考文献:

[1] 胡实,莫兴国,林忠辉. 未来气候情景下我国北方地区干旱时空变化趋势[J]. 干旱区地理,2015,38(2):239-248.

[2] 杨吉华,张永涛,孙明高,等. 石灰岩丘陵土壤旱作保水技术的研究[J]. 水土保持学报,2000,14(3):62-66.

YANG J H,ZHANG Y T,SUN M G,*et al.* Study on technique of dry farming and water retention in limestone hill[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2000,14(3):62-66. (in Chinese)

[3] 薛晓萍. 山东干旱与农业产量定量关系研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2004.

[4] 万明波,董旭光. 山东省 1961~2010 年降水的非均匀性特征[J]. 干旱气象,2015,33(4):566-573.

[5] 杨建伟,韩蕊莲,刘淑明,等. 不同土壤水分下杨树的蒸腾变化及抗旱适应性研究[J]. 西北林学院学报,2004,19(3):7-10.

YANG J W,HAN R L,LIU S M,*et al.* Transpiration and drought Resistance of poplar under different soil drought[J]. Journal of Northwest Forestry University,2004,19(3):7-10. (in Chinese)

[6] 鲁佩,董婕,高新甜. 基于 SPEI 的华北平原近 55 年干旱时空特征分析[J]. 河南科学,2016,34(9):1551-1556.

LU P,DONG J,GAO X T. Temporal and spatial characteristics of drought in north China plain over the past 55 years based on SPEI[J]. Henan Science,2016,34(9):1551-1556. (in Chinese)

[7] 张磊,潘婕,陶生才,等. 基于标准化降水指数的近 51a 山东临沂市旱涝时空特征[J]. 干旱气象,2013,31(4):695-701.

[8] 李翔翔,居辉,刘勤,等. 基于 SPEI-PM 指数的黄淮海平原干旱特征分析[J]. 生态学报,2017,37(6):1-13.

LI X X,JU H,LIU Q,*et al.* Analysis of drought characters based on the SPEI-PM index in Huanghuaihai Plain[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(6):1-13. (in Chinese)

[9] 苏宏新,李广起. 基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系[J]. 生态学报,2012,32(17):5467-5475.

SU H X,LI G Q. Low-frequency drought variability based on

SPEI in association with climate indices in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(17):5467-5475. (in Chinese)

[10] 李月,白晓永,周运超,等. 基于 SPEI 的贵州省近 60 年干旱时空特征分析[J]. 中国水土保持,2015(7):57-60.

[11] 任培贵,张勃,张调风,等. 基于 SPEI 的中国西北地区气象干旱变化趋势分析[J]. 水土保持通报,2014,34(1):182-187.

REN P G,ZHANG B,ZHANG T F,*et al.* Trend analysis of meteorological drought change in northwest China based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2014,34(1):182-187. (in Chinese)

[12] 张勃,张耀宗,任培贵,等. 基于 SPEI 法的陇东地区近 50a 干旱化时空特征分析[J]. 地理科学,2015,35(8):999-1006.

ZHANG B,ZHANG Y Z,REN P G,*et al.* Analysis of drought spatial-temporal characteristics based on SPEI in eastern region of Gansu in recent 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica,2015,35(8):999-1006. (in Chinese)

[13] RICHARD R,HEIM Jr. A review of twentieth-century drought indices used in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2002,83(8):1149-1165.

[14] ALLEY W. The palmer drought severity index; limitations and assumptions[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology,1984,23(7):1100-1109.

[15] VICENTE-SERRANO S M,BEGUERÍA S,LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate,2010,23(7):1696-1718.

[16] VICENTE-SERRANO S M,BEGUERÍA S,LÓPEZ-MORENO J I,*et al.* A new global 0.5° gridded dataset (1901—2006) of a multiscalar drought index; comparison with current drought index datasets based on the palmer drought severity index[J]. Journal of Hydrometeor,2010,11(4):1033-1043.

[17] 朱新玉. 基于 SPEI 的豫东地区近 50 年干旱演变特征[J]. 自然灾害学报,2015,24(4):128-137.

ZHU X Y. The variation in the characteristics of drought in east Henan Province over a 50-year period based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Natural Disasters,2015,24(4):128-137. (in Chinese)

[18] 孙滨峰,赵红,王效科. 基于标准化降水蒸发指数(SPEI)的东北干旱时空特征[J]. 生态环境学报,2015,24(1):22-28.

SUN B F,ZHAO H,WANG X K. Spatiotemporal characteristics of drought in northeast China based on SPEI[J]. Ecology and Environmental Sciences,2015,24(1):22-28. (in Chinese)

[19] 李伟光,侯美享,陈汇林,等. 基于标准化降水蒸散指数的华南干旱趋势研究[J]. 自然灾害学报,2012,21(4):84-90.

LI W G,HOU M T,CHEN H L,*et al.* Study on drought trend in south China based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Natural Disasters,2012,21(4):84-90. (in Chinese)

[20] 张调风,李林,刘宝康,等. 基于 SPEI 指数的近 52 年青海省农(牧)作物生长季干旱动态格局分析[J]. 生态学杂志,2014,33(8):2221-2227.

[21] 李雅善,王振吉,王艳君,等. 甘肃河西走廊酿酒葡萄栽培区旱情时空特征差异分析[J]. 西北林学院学报,2015,30(4):50-56.

- LI Y S, WANG Z J, WANG Y J, *et al.* Temporal-spatial variation characteristics of the drought in wine grape cultivation areas in Hexi Corridor[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(4): 50-56. (in Chinese)
- [22] 轩俊伟, 郑江华, 刘志辉. 基于 SPEI 的新疆干旱时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2016, 33(2): 338-344.
- [23] 闫峰, 王艳姣, 吴波. 近 50 年河北省干旱时空分布特征[J]. 地理研究, 2010, 29(3): 423-430.
- [24] 史本林, 朱新玉, 胡云川, 等. 基于 SPEI 指数的近 53 年河南省干旱时空变化特征[J]. 地理研究, 2015, 34(8): 1547-1558.
- [25] 赵兴凯, 李增尧, 朱清科. 基于 SPI 和 SPEI 陕北黄土区土壤水分对气候特征的响应[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 155-163.
- ZHAO X K, LI Z Y, ZHU Q K. Response of soil moisture on climate characteristics based on SPI and SPEI in Loess Region of northern Shaanxi[J]. 2016, 47(8): 155-163. (in Chinese)
- [26] 张岳军, 郝智文, 王雁, 等. 基于 SPEI 和 SPI 指数的太原多尺度干旱特征与气候指数的关系[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1418-1424.
- ZHANG Y J, HAO Z W, WANG Y, *et al.* Multiscale characteristics of drought based on SPEI and SPI in association with climate index in Taiyuan[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(9): 1418-1424. (in Chinese)
- [27] 张建华, 刘静如, 张玺. 鲁中山区泉水村落的形态类型及利用策略[J]. 山东建筑大学学报, 2013, 28(3): 204-209.
- ZHANG J H, LIU J R, ZHANG X. Morphological types and utilization strategies of spring villages in the mountain area of central Shandong Province[J]. Journal of Shandong Jian Zhu University, 2013, 28(3): 204-209. (in Chinese)
- [28] 张永利, 张宪强, 王仁卿. 鲁中山区植物区系初步研究[J]. 山东林业科技, 2005(1): 1-5.
- [29] 刘静如. 鲁中山区泉水村落空间类型研究与保护利用[D]. 济南: 山东建筑大学, 2013.
- [30] PARTAL T, KAHYA E. Trend analysis in Turkish precipitation data[J]. Hydrological Processes, 2006, 20(9): 2011-2026.
- [31] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London: Griffin, 1948.
- [32] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [33] GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of precipitation and drought data in Serbia over the period 1980—2010[J]. Journal of Hydrology, 2013, 494: 32-42.
- [34] 王月海. 山东干旱瘠薄山地造林新技术试验[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 60-64.
- WANG Y H. New techniques of afforestation on the dry and barren land in the mountainous region of Shandong Province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(2): 60-64. (in Chinese)
- [35] 石春玲, 李峰, 孟祥新, 等. 山东省 2010~2011 年秋冬连旱特征及成因[J]. 干旱气象, 2012, 30(3): 323-326.
- [36] 张玉静, 王春乙, 张继权. 基于 SPEI 指数的华北冬麦区干旱时空分布特征分析[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 7097-7107.
- ZHANG Y J, WANG C Y, ZHANG J Q. Analysis of the spatial and temporal characteristics of drought in the north China plain based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): 7097-7107. (in Chinese)
- [37] 安雪丽, 王前锋, 莫新宇, 等. 华北地区农业干旱灾害变化特征[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2016, 52(5): 591-596.
- AN X L, WANG Q F, MO X Y, *et al.* Characteristics of agricultural drought disaster in Northern China[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2016, 52(5): 591-596. (in Chinese)
- [38] 蒋红花. 山东省干旱灾害的变化特征及相关分析[J]. 灾害学, 2000, 15(3): 52.
- [39] 顾润源, 汤子东. 2002 年夏季山东干旱成因分析[J]. 气象, 2004, 30(8): 22-26.
- [40] 全川, 杨玉盛. 飓风和台风对沿海地区森林生态系统的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5337-5344.
- TONG C, YANG Y S. A review of the impacts of hurricanes and typhoons on forest ecosystem s in coastal areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5337-5344. (in Chinese)
- [41] 李传林, 朱江. 气候变化对森林的危害—以干旱为例[J]. 水土保持应用技术, 2014(3): 31-33.
- [42] 丁文广, 肖俊豪, 汪霞. 气候变化对我国森林自然灾害的影响[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(5): 117-120.
- DING W G, XIAO J H, WANG X. Influence of climate changes on natural disaster in forests in China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(5): 117-120. (in Chinese)
- [43] 张鹏霞, 叶清, 欧阳芳, 等. 气候变暖、干旱加重江西省森林病虫害灾害[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 639-649.
- ZHANG P X, YE Q, OUYANG F, *et al.* Global warming and droughts aggravates forest damage resulting from pests and diseases in Jiangxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 639-649. (in Chinese)
- [44] 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 等. 森林的风/雪灾害研究综述[J]. 生态学报, 2005, 25(1): 148-157.
- LI X F, ZHU J J, WANG Q L, *et al.* Forest damage induced by wind/snow: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(1): 148-157. (in Chinese)
- [45] 王莹, 吴荣军, 郭照冰. 基于实际蒸散构建的干旱指数在黄淮海地区的适用性[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1603-1610.
- WANG Y, WU R J, GUO Z B. Applicability of established drought index in Huanghuaihai region based on actual evapotranspiration[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1603-1610. (in Chinese)