

崔素芳, 张保祥, 荣燕妮, 等. 基于云模型的山东省干旱时空分布特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 679-688. CUI S F, ZHANG B X, RONG Y N, et al. Characteristics of temporal-spatial drought distribution in Shandong Province based on cloud model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 679-688. (in Chinese)

基于云模型的山东省干旱时空分布特征

崔素芳¹, 张保祥², 荣燕妮¹, 姜欣², 王振¹, 刘振¹, 付军¹

(1. 山东农业工程学院, 济南 250100; 2. 山东省水利科学研究院, 济南 250014)

摘要: 基于山东省 29 个气象站 1951—2017 年的实测气象数据, 主要采用降水量距平百分率作为气象干旱等级评价指标, 通过云模型分析山东省干旱时空分布的均匀性和稳定性特征, 并采用 ArcGIS 的反距离权重法分析不同时间尺度下的干旱频次空间分布特征。结果表明: 山东省降水量距平百分率呈逐年波动式下降趋势, 但下降趋势不明显, 干旱发生具有明显的季节性, 呈现出季节性连旱现象; 从时间尺度来看, 年尺度上干旱分布的模糊性和随机性较小, 干旱的确定性更容易度量, 干旱分布不均匀性的稳定程度较低; 对季节间云数字特征的对比显示, 多年来冬、秋季干旱分布的模糊性和随机性较大, 冬季干旱分布的确定性最难以度量; 在稳定性方面秋季最稳定, 春季次之, 夏季最不稳定; 在空间尺度上, 鲁西北地区发生干旱、严重干旱和特大干旱的频次最高; 发生轻度干旱的频次最高区位于胶东半岛, 鲁南地区次之; 发生中度干旱的频次最高区位于鲁中地区, 鲁南地区次之; 由超熵值大小判定干旱分布不均匀性的稳定程度, 表现为鲁西北地区最稳定, 鲁中地区次之, 胶东半岛最不稳定; 从干旱分布的均匀性分析得出鲁西南地区干旱分布最不均匀, 鲁西北地区干旱分布最均衡; 山东省干旱频次在空间上的分布表现为春旱和冬旱呈从西北向东南递减的趋势, 秋旱比较严重。云模型针对半湿润地区的干旱分布具有较好的应用前景。

关键词: 干旱; 降水量距平百分率; 均匀性; 稳定性; 云模型

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0067

干旱是一种不确定性极高的慢性自然灾害, 除了具有影响范围大、持续时间长、危害程度深等特点外, 干旱事件还具有模糊性和随机性的特点, 其对社会经济发展和危害和影响早已引起国际社会的广泛重视, 并成为气候变化研究中的热点问题之一^[1-4]。随机性与必然性相对, 源于随机数学, 指事件本身的定义是确定的, 但事件是否发生不确定。模糊性与精确性相对, 源于模糊数学, 指对事件本身的认知不确定, 模糊性和随机性统称为不确定性。干旱的本质是降水偏少导致水分亏缺, 降水现象是随机发生的气象事件, 导致干旱事件的发生具有随机性特点。旱情发生后干旱历时及干旱烈度等干旱特征指标也具有随机性的特点。干旱事件的模糊性是指当前对于干旱指标选取、干旱过程识别、干旱特征变量提取、干旱频次分析等方面的现有研

究仅是对干旱这一自然事件演化及致灾机理的初步认识, 认识水平有待进一步深入。

由于干旱成因复杂、影响因素繁多, 目前的干旱定义尚没有统一。现有研究多从行业角度把干旱分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱, 其中气象干旱是其他 3 种干旱类型的基础, 持续性气象干旱将诱发其他 3 种干旱的发生。干旱将会导致粮食减产、河道断流、湿地减少、生态退化、生物多样性减少、荒漠化加剧、缺水风险增加等方面问题, 严重影响到粮食安全、生态环境、供水安全、经济发展及社会稳定^[5-7]。因此, 研究气象干旱的发生规律具有重要意义。国内外学者^[8-11]对干旱的研究主要聚焦在干旱风险评估及管理、干旱监测及预警、干旱指标构建、干旱胁迫影响、干旱演变过程等方面, 而对于干旱发生的随机性和模糊性研究较少。

收稿日期: 2023-01-03 修回日期: 2023-07-18 网络出版时间: 2023-08-08

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230807.1628.008>

基金项目: 山东省教育厅项目(J17KB040); 国家级大学生创新创业训练项目(201914439006); 山东省重点研发计划(公益类专项)项目(2017GSF20101)

作者简介: 崔素芳(1981—), 女, 山东济宁人, 讲师, 博士, 主要从事区域水资源高效利用及水环境保护研究。E-mail: cuisufang1981@163.com

通信作者: 张保祥(1966—), 男, 山东寿光人, 研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事水资源开发与水环境保护研究。E-mail: baoxiang.zh@126.com

云模型能充分考虑到评价中的随机性、模糊性及两者之间的关联性,实现定性信息与定量信息相互转换,分析结果更加符合客观事实。因此,采用云模型对干旱时空分布特征进行定性描述和定量分析,从时间、空间两个维度探寻干旱时间发生的随机性和模糊性、干旱空间分布的均匀性和稳定性,可以弥补目前对干旱特征研究中的不足,并可以进行推广应用。山东省作为国家当前正在实施的黄河流域生态保护和高质量发展的重要区域,生态农业高质量发展尤为重要,而干旱是影响生态农业高质量发展的限制性因素之一,深入分析干旱分布特征规律,掌握干旱发生的季节性和区域性特征,可为山东省生态农业发展制定防灾减灾措施提供理论依据。

1 研究区概况

山东省地处我国东部沿海、黄河下游,地跨黄、淮、海三大流域,分半岛和内陆两部分,面积 1 580 万 hm^2 ,是我国重要的农产区,素有“粮棉油之库”“水果水产之乡”之称,粮食产量居全国第 2 位,并拥有全国最大的蔬菜基地^[12-14]。由于山东省气候处于南北方交接地带,是湿润与半湿润交界区,该区域对气候变化响应较为敏感和强烈。干旱灾害频发,“十年九旱”是山东省省情和水情的真实写照^[15-17]。据统计,1961—2011 年的 51 年间,除 1964 年外,有 50 年发生不同程度的干旱灾害,全省平均每年干旱受灾面积 173.72 万 hm^2 ,成灾面积 106.54 万 hm^2 ^[18]。因此,干旱已经成为山东省农业生产的重要制约因素,对农业生产造成了巨大的损失。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

采用中国气象科学数据共享服务网作为主要的数据来源,选取山东省 29 个气象站点近 67 年逐月气象数据。29 个气象站降水数据均存在一定程度的缺失,数据缺失率为 0.56%,采用时间插值和空间插值两种方法对缺失数据进行插补处理,插补后对所得降水数据采用 von Neumann ratio(N)、stand normal homogeneity test (SNHT)、Pettitt test 3 种统计方法进行均一性验证,处理后的数据均通过了 95% 置信度的均一性验证^[19-20]。

2.2 研究方法

2.2.1 降水量距平百分率

降水量距平百分率(P_a)表示某时段降水量与同

期平均状态的偏离程度,优点在于能直观反映降水异常引起的干旱,常被作为划分旱涝等级标准的依据。计算公式及干旱等级划分详见气象干旱等级标准(GB/T 20481—2017)^[21]。降水量距平百分率干旱等级标准见表 1。

表 1 降水量距平百分率干旱等级标准

Tab. 1 Standard of classification for drought based on precipitation anomaly percentage

等级	类型	降水量距平百分率/%	
		季尺度	年尺度
1	无旱	$-25 < P_a$	$-15 < P_a$
2	轻度干旱	$-50 < P_a \leq -25$	$-30 < P_a \leq -15$
3	中度干旱	$-70 < P_a \leq -50$	$-40 < P_a \leq -30$
4	重度干旱	$-80 < P_a \leq -70$	$-45 < P_a \leq -40$
5	特大干旱	$P_a \leq -80$	$P_a \leq -45$

2.2.2 云模型

云模型由概率论和模糊数学演化而来,是一种定性语言、定量数值和定型概念之间的转换模型,相对于常用来识别干旱的传统指标来说,它的优点在于可以实现定量与定性之间的相互转换^[22-24],云模型改进了常规模糊综合评判法中的定性成分,用隶属云函数代替传统隶属度函数,兼顾了系统的模糊性和随机性,并且指标分级上,根据数据自身特征分级,定性且定量确定评价对象的权重,并以“云滴”形式直观地展现。

云图(图 1)的绘制主要由 MATLAB 编程实现,在云图中“云层”的厚薄程度受“云滴”的离散程度(熵 E_n 值大小)和“云滴”的凝聚程度(超熵值 H_e 大小)共同影响。熵值表示“云滴”凝聚程度,熵 E_n 值越大,“云滴”的离散度也越大,“云滴”分布越不均匀,“云层”厚度也越大;超熵值通过衡量熵的情况反映“云滴”的凝聚性,表示“云层”薄厚程度。超熵值 H_e 越大,“云滴”的凝聚程度越低,“云层”也越厚。云图整体描述的是与云图对应的模糊概念的不确定性程度,“云滴”不均匀性可理解为不同“云滴”对应的不确定性程度不同,越靠近均值,“云层”越密集,“云滴”确定度值越大,确定性程度越高,相反,越远离均值,“云层”越稀疏,“云滴”确定度值越小,“云滴”不确定性水平越高。云模型主要通过两种算法实现即正向云发生器与逆向云发生器。将计算得到的降水量距平百分率数值输入到逆向

云发生器中,计算得到云模型中的数字特征值(E_x 、 E_n 、 H_c)。把数字特征值输入到正向云发生器中,正向云发生器也是通过编程实现,由 MATLAB 软件运行获得云模型的云图。有关正向云发生器、逆向云发生器具体算法步骤可以参阅相关文献^[25-27]。

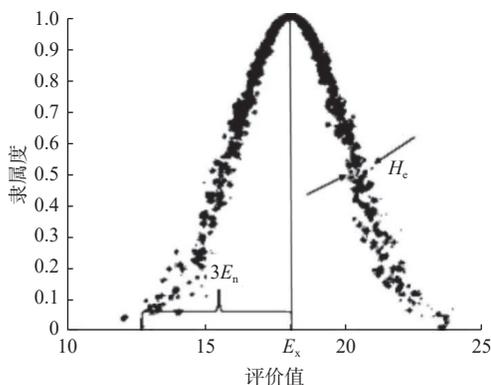


图1 “云图”数字特征

Fig. 1 “Cloud Map” digital feature diagram

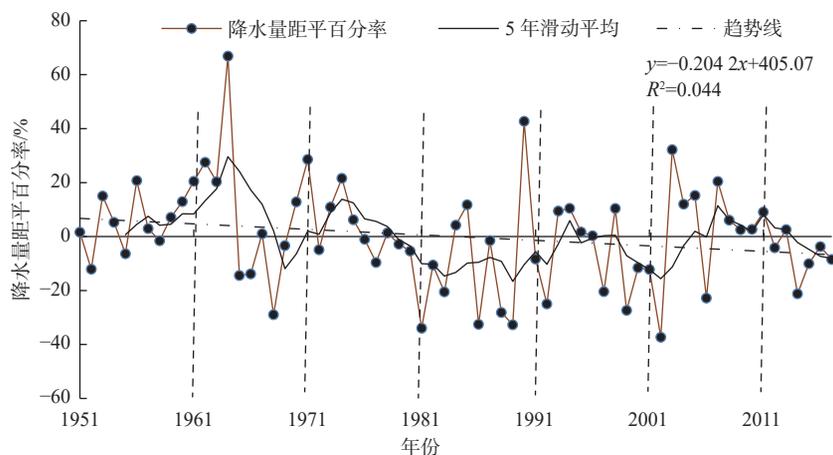


图2 山东省 1951—2017 年降水量距平百分率变化

Fig. 2 Yearly variations of precipitation anomaly percentage in Shandong Province from 1951 to 2017

表2 山东省 1951—2017 年降水量距平百分率变化趋势检验

Tab. 2 Test on the change trend of precipitation anomaly percentage from 1951 to 2017 in Shandong Province

Spearman相关系数r	Spearman统计量 T	临界值	趋势性
-0.201	1.62	2.01	不显著

分析表3可见,山东省干旱发生具有明显的季节性,有8年发生夏旱,大于春旱、秋旱和冬旱出现的次数,说明普遍存在夏季降水量明显少于常年值的特点,究其原因主要是年降水量少且时空分布不均匀、年径流量丰枯悬殊、受厄尔尼诺现象影响等有关。1981年、1986年、1988年出现了春旱、秋旱、冬旱,2002年出现了夏旱、秋旱、冬旱,说明山东省的干旱具有三季连旱的现象。两季连旱主要

3 结果与分析

3.1 干旱年际变化规律

采用线性回归法、滑动平均法及 Spearman 秩序相关验证法对降水量距平百分率下降趋势进行验证,见图2和表2。

由图2、表2可知,降水量距平百分率随时间呈现波动下降趋势,在0.05置信度下,检验得出降水量距平百分率随时间下降趋势不显著。

由表3可见,在1951—2017年67年间有12年发生干旱,其中发生轻度干旱占66.7%、中度干旱占33.3%。2002年干旱最为严重,1981、1986、1989年的干旱相对严重,这与有关学者^[28-29]对1950—2004年山东省历史重要旱灾统计结果基本相同,说明采用降水量距平百分率作为干旱指标,在山东省的干旱识别中适用性较好。

是夏旱、冬旱,属于轻度干旱。

由于干旱发生具有随机性和模糊性特点,为了分析干旱分布的不均匀性和稳定性,采用云模型进一步进行分析,结果见表4和图3。

由表4可以看出: E_n 年尺度最小(17.848),说明年尺度干旱分布的模糊性和随机性较小; E_x 年尺度最小(0.008),说明年尺度干旱的确定性更容易度量; H_c 年尺度的超熵值最大(6.437),表明年尺度干旱分布不均匀性的稳定程度较低。对季节间云数字特征的对比显示:熵值 E_n 秋、冬季较大,说明秋、冬季干旱分布的随机性较大,也最模糊;期望值 E_x 冬季>春季>秋季=夏季,说明在冬季最难判别干旱分布的确定性;超熵值 H_c 秋季最小。由图3可见,分析“云层”的厚薄程度以及“云滴”的凝聚情况,曲线

顶点(期望值 E_x)距离曲线区间(E_x-3E_n, E_x+3E_n)两端的值越大,表明“云滴”分布越不均匀,“云层”也越厚。通过对比曲线顶点距离曲线两端的距离和曲线上点的分布聚集状态,可以判定:秋季“云层”比其他季节薄,“云滴”分布表现出高度的凝聚性,说

明秋季干旱分布的不均匀性最稳定;夏季“云层”最厚,“云滴”的分布最为离散,表明夏季干旱分布的不均匀性最不稳定。总之,从干旱分布的均匀、稳定性来看,年尺度上干旱分布最不均匀,秋季干旱分布具有稳定的不均匀性,夏季最不稳定。

表 3 山东省 1951—2017 年干旱年份降水量距平百分率
Tab. 3 Precipitation anomaly percentage of drought years in Shandong Province from 1951 to 2017

干旱年份	降水量距平百分率/%					年干旱等级	季节干旱类型
	春季	夏季	秋季	冬季	全年		
1968	-7.04	-41.25	-11.62	-10.68	-28.96	轻旱	夏旱
1981	-54.87	-21.66	-56.80	-42.69	-33.99	中旱	春旱、秋旱、冬旱
1983	19.53	-41.08	25.98	-54.41	-20.54	轻旱	夏旱、冬旱
1986	-57.24	-20.23	-57.00	-25.58	-32.53	中旱	春旱、秋旱、冬旱
1988	-24.52	-16.96	-62.72	-59.97	-28.12	轻旱	春旱、秋旱、冬旱
1989	-5.38	-39.04	-44.32	9.37	-32.72	中旱	夏旱、秋旱
1992	-31.90	-40.37	13.13	65.00	-24.99	轻旱	春旱、夏旱
1997	24.46	-34.79	-22.97	42.81	-20.41	轻旱	夏旱
1999	-4.79	-44.59	25.72	-87.31	-27.36	轻旱	夏旱、冬旱
2002	35.42	-50.69	-51.81	-32.23	-37.33	中旱	夏旱、秋旱、冬旱
2006	-3.12	-13.55	-72.70	-12.61	-22.80	轻旱	秋旱
2014	1.72	-36.55	13.93	-31.05	-21.21	轻旱	夏旱、冬旱

表 4 山东省 1951—2017 年降水量距平百分率不同时间尺度的云模型数字特征

Tab. 4 Cloud model digital characteristic at different time scale of precipitation anomaly percentage in Shandong Province from 1951 to 2017

时间	云模型数字特征		
	E_x	E_n	H_c
春季	0.055	36.207	3.932
夏季	0.055	22.312	6.001
秋季	0.081	41.682	1.347
冬季	0.448	45.730	4.983
1951—2017年	0.008	17.848	6.437

3.2 干旱空间分布特征

根据山东省降雨分布特征,将山东省分为胶东半岛、鲁中地区、鲁西北地区、鲁西南地区、鲁南地区。本研究采用的 29 个气象站点中,长岛、龙口、福山、烟台、成山、莱阳、青岛、海阳、石岛位于胶东半岛,济南、泰安、泰山、淄博、淄川、沂源、潍坊位于鲁中地区,德州、陵县、惠民、莘县、东营、垦

利位于鲁西北地区,兖州、菏泽、定陶位于鲁西南地区,临沂、费县、莒县、日照位于鲁南地区。计算 67 年(1951—2017 年)间干旱发生的频次,分析不同干旱等级空间分布规律,结果见图 4。

计算得出 29 个站点 67 年间所发生干旱的平均频次为 30.1%,其中轻度干旱的频次(18.1%)>中度干旱(7.2%)>特大干旱(3.2%)>严重干旱(1.6%),说明山东省干旱等级主要以轻度干旱为主。由图 4(a)可见,鲁西北地区、胶东半岛发生干旱的频次较高,鲁西北地区的东营、德州、陵县发生干旱频次较高,胶东半岛地区的福山、成山、青岛发生干旱频次较高,鲁中地区、鲁西地区和鲁南地区干旱发生频次差距不大。由图 4(b)可见:发生轻度干旱的频次主要以胶东半岛、鲁南地区、鲁西南地区为主,鲁西北地区、鲁中地区差别较小,鲁西北比鲁中地区发生轻度干旱的频次高 0.1%;胶东半岛主要是福山、石岛、海阳轻度干旱频次较高,鲁南地区主要表现为日照和临沂轻度干旱频次较高,鲁西南地区主要是兖州轻度干旱频次较高。由图 4(c)可见:中度干旱

主要发生在鲁中地区和鲁南地区,鲁中地区主要发生在沂源、淄博、淄川;中度干旱频次最高值位于鲁西北地区的垦利、其次为胶东半岛的青岛市。由图4(d)可见,严重干旱主要发生在鲁西北地区、鲁中地区、鲁西南地区,胶东半岛和鲁南地区发生频

次较低。由图4(e)可见,特大干旱主要发生在鲁西北地区。总之,发生干旱、严重干旱和特大干旱频次最高的区域位于鲁西北地区;发生轻度干旱频次最高的区域位于胶东半岛,鲁南地区次之;鲁中地区发生中度干旱的频次最高,鲁南地区次之。

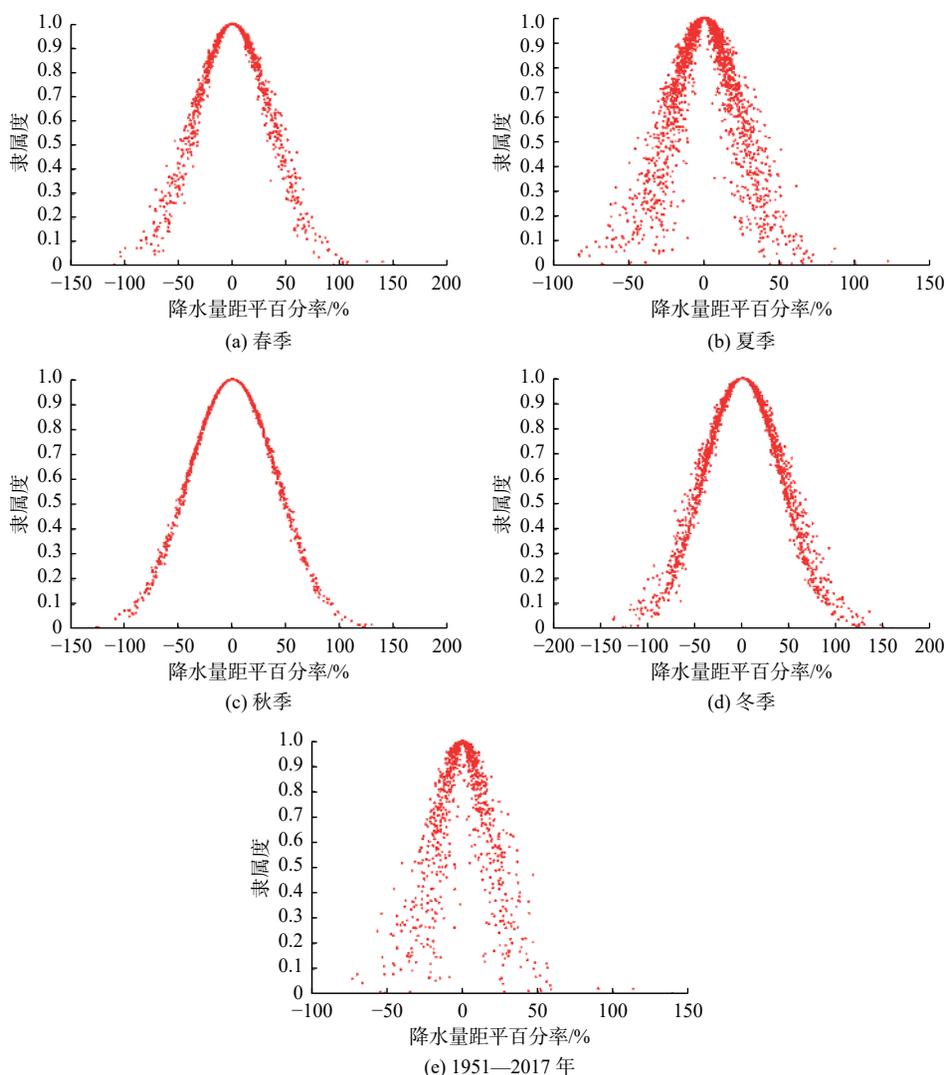
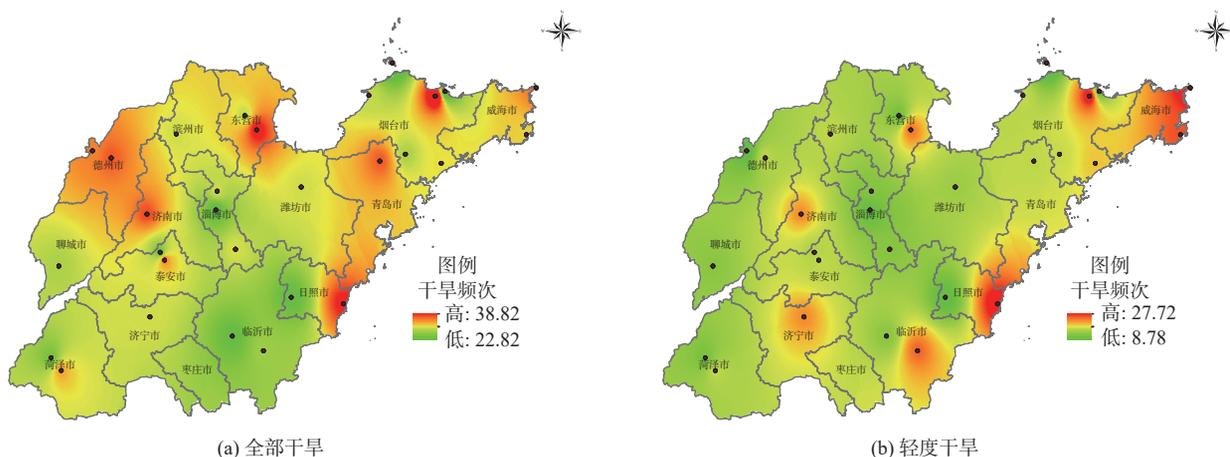


图3 山东省1951—2017年不同时间尺度的降水量距平百分率隶属度云图

Fig. 3 Membership degree cloud map of precipitation anomaly percentage at different time scale in Shandong Province from 1951 to 2017



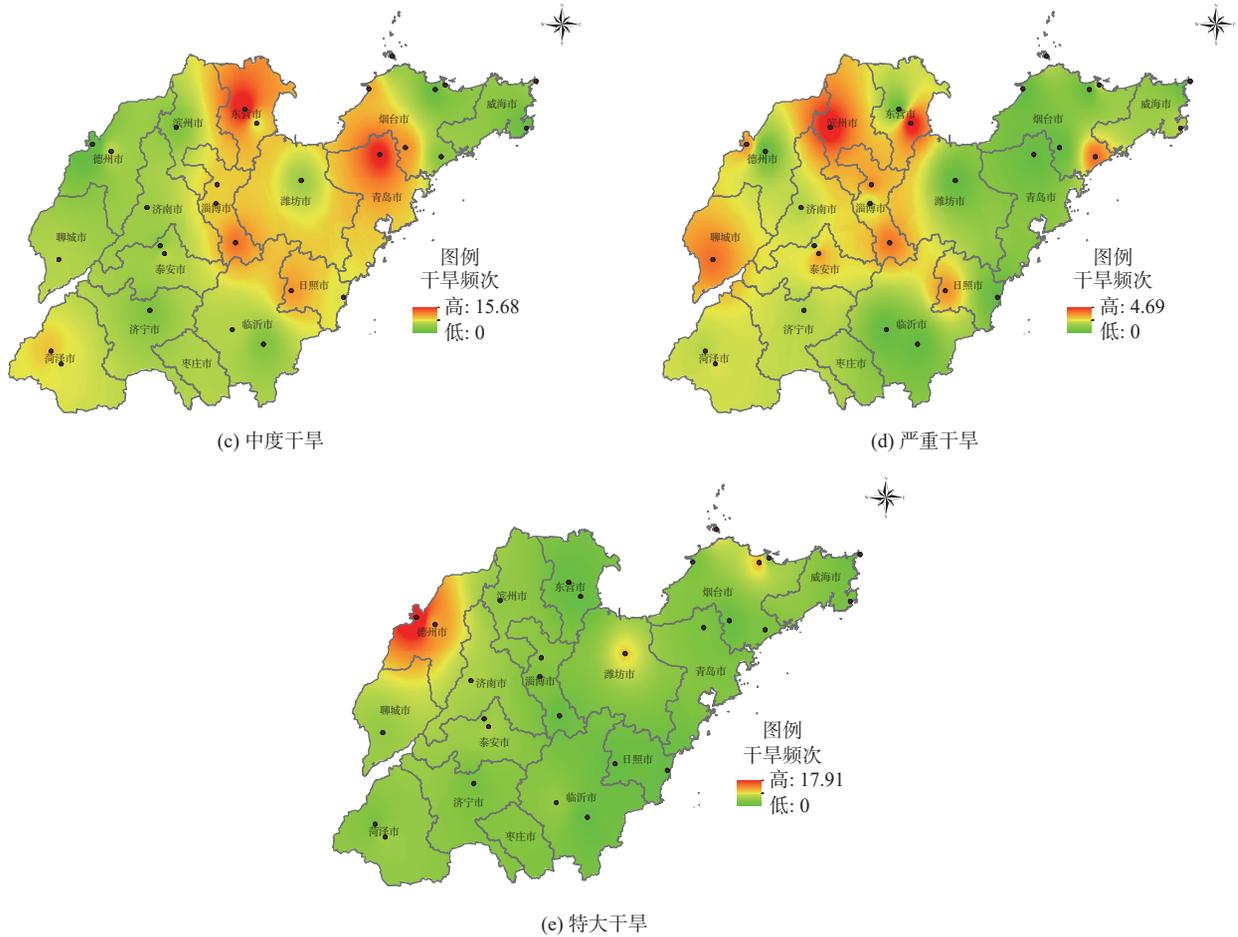


图 4 山东省不同干旱等级空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of different drought grades in Shandong Province

底图来源: 山东省 2020 年地理省情监测数据成果

山东省不同区域降水量距平百分率空间分布云模型数字特征见表 5, 降水量距平百分率空间分布的隶属度云图见图 5。

由表 5 可知: 熵值 E_n 鲁西北地区>胶东半岛>鲁中地区>鲁南地区>鲁西南地区, 表明多年来鲁西北地区干旱分布的模糊性和随机性最大; 超熵值 H_c 鲁西北地区>鲁中地区>鲁南地区>胶东半岛>鲁西南地区, 表明多年来鲁西北地区干旱分布的稳定性最强, 胶东半岛最不稳定。

由图 5 可知: 根据期望值距离区间 $[E_x-3E_n,$

$E_x+3E_n]$ 两端远近, 可以判定出鲁西北地区干旱的确定性相对于其他地区更容易度量; 根据“云滴”的分布和“云层”的厚薄程度, 判定出在干旱分布的不均匀性上, 鲁西南地区最不均匀, 鲁西北地区最均匀。究其原因可以归结为鲁西北平原区受海陆位置及季风气候的影响, 降雨量偏少, 加之地形平坦, 不易形成地形雨, 因此干旱分布比较均匀。有学者对鲁西南地区的降雨特征进行分析, 表明近 50 年来鲁西南地区中南部降水量增加趋势明显, 中北部减少趋势明显, 契合了鲁西南地区干旱分布不均匀性的规律^[30]。

表 5 山东省 1951—2017 年降水量距平百分率空间分布云模型数字特征

Tab. 5 Cloud model digital characteristic of precipitation anomaly percentage of spatial distribution in Shandong Province from 1951 to 2017

地区	云模型数字特征		
	E_x	E_n	H_c
胶东半岛	0.2770	26.894	5.601
鲁中地区	-0.2590	26.000	7.293
鲁西北地区	-1.7330	29.851	9.079
鲁西南地区	-0.4910	24.043	5.596
鲁南地区	0.0281	24.564	5.703

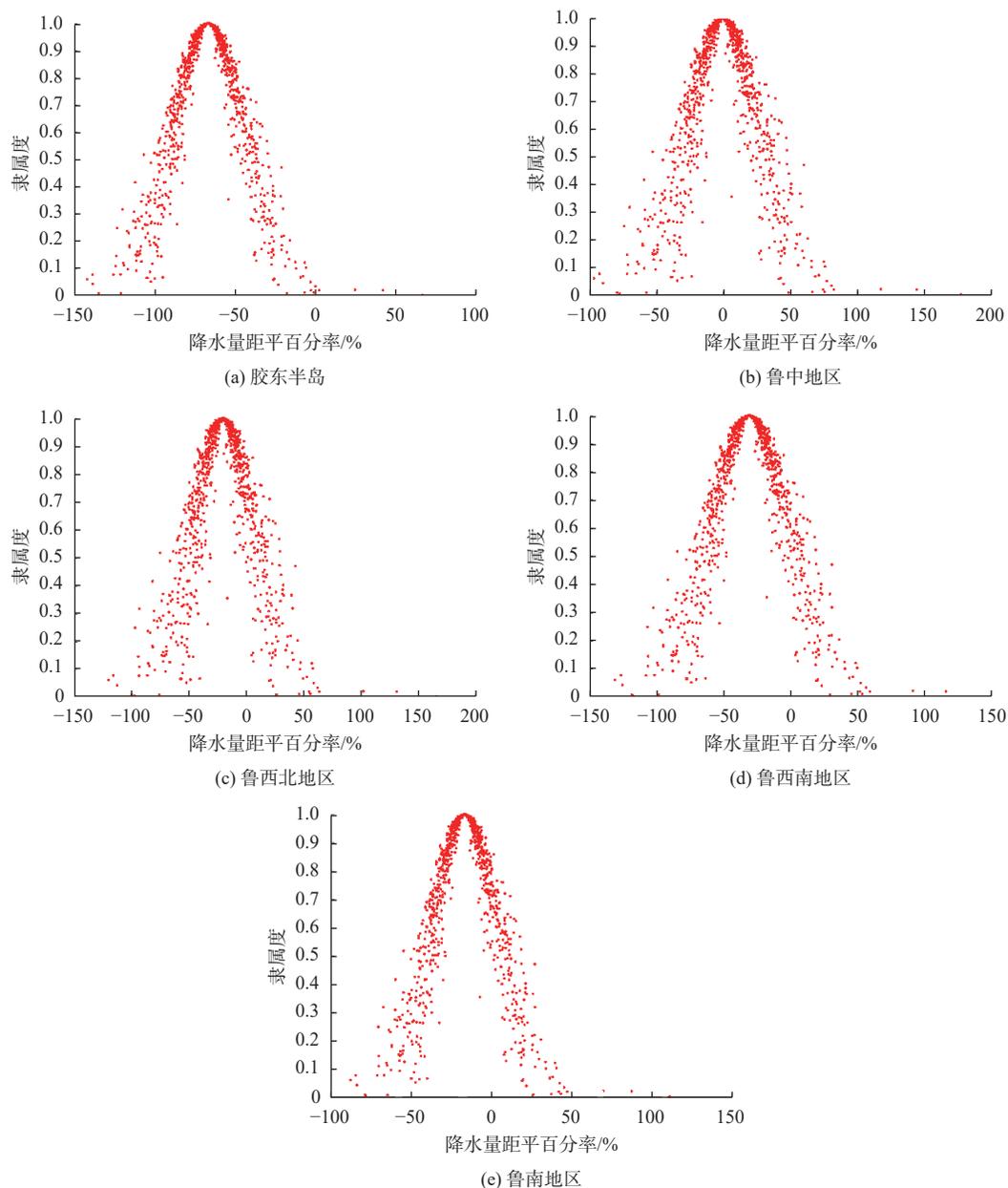
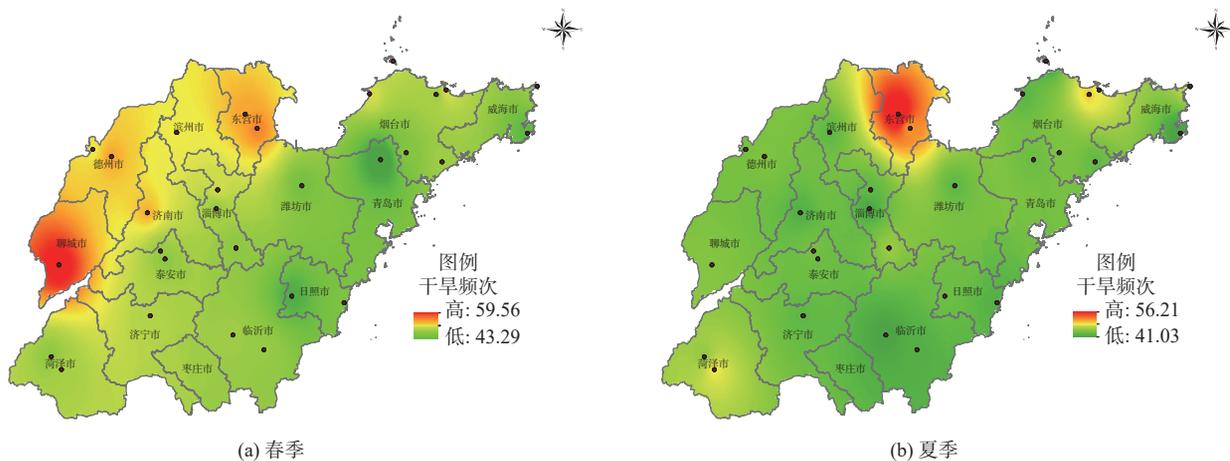


图5 山东省1951—2017年降水量距平百分率空间分布的隶属度云图

Fig. 5 Membership degree cloud map of precipitation anomaly percentage spatial distribution in Shandong Province from 1951 to 2017

统计计算山东省各气象站点(1951—2017年)四季及全年的干旱频次,采用 ArcGIS10.2 软件中的

反距离权重法进行插值处理,绘制得到山东省干旱频次空间分布图见图6。



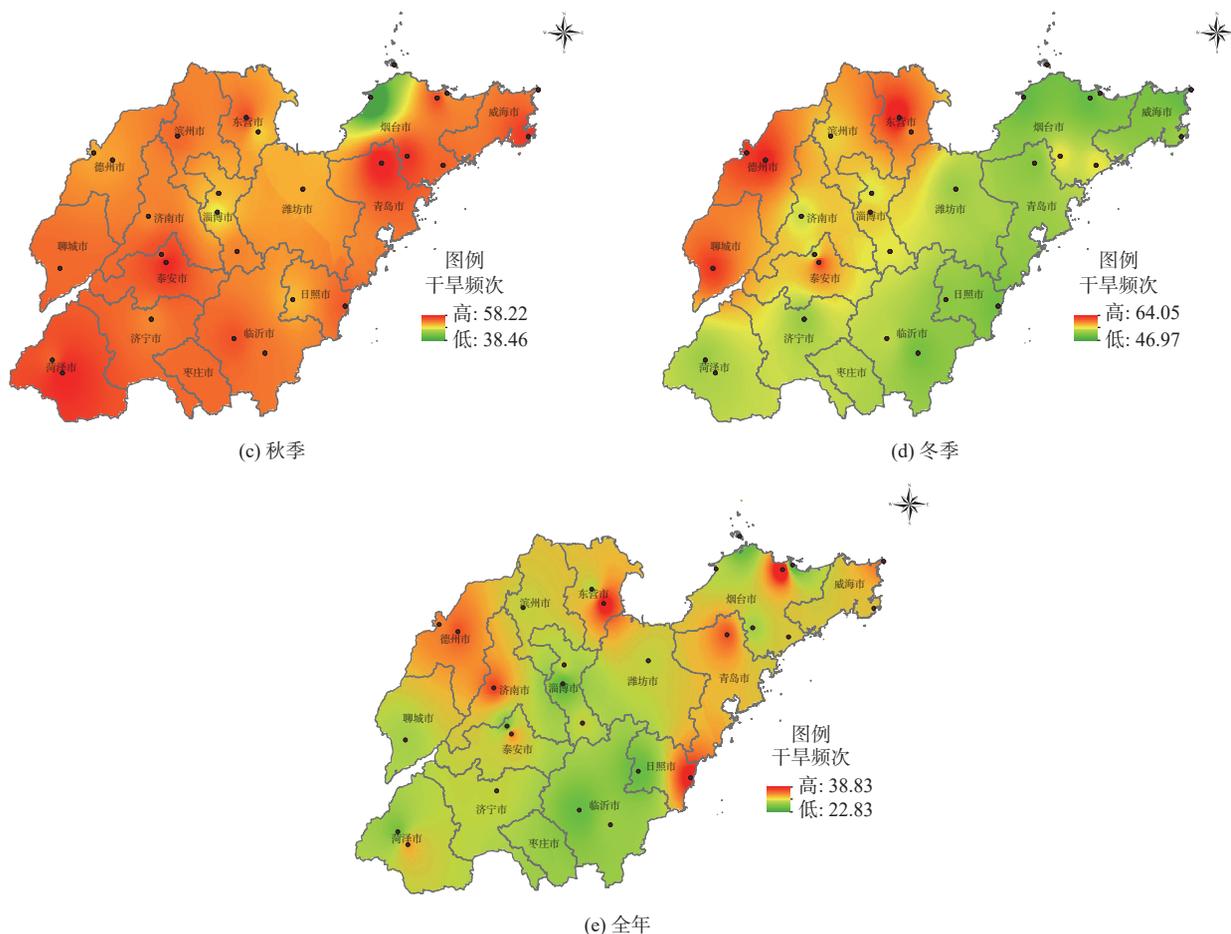


图 6 山东省不同时间尺度干旱频次空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of frequency of drought at different time scale in Shandong Province

底图来源: 山东省 2020 年地理省情监测数据成果

由图 6 可知: 春季干旱发生频次基本上呈现由西北向东南递减的趋势, 聊城春旱最为严重, 鲁西北地区多年平均降水量小于 650 mm, 约 70% 降水集中在夏季, 其次是秋季, 所以春旱比较严重; 夏季干旱发生的频次相比其他 3 个季节偏低, 东营市发生夏旱的频次最高; 秋季旱情除烟台市部分地区外, 其他地区旱情都比较严重, 这与近几十年来秋季降水持续偏少有关; 冬季干旱发生的频次呈现由西北向东南递减的趋势, 聊城、德州、东营、滨州、泰安冬旱比较严重。山东省在年尺度上干旱发生频次高值区位于鲁西北地区(德州、东营)、胶东半岛(青岛、烟台、威海)、鲁中地区的济南靠近德州的部分地区、鲁南地区的日照临海地区。胶东半岛干旱的原因之一可以归结为地理位置因素、厄尔尼诺现象。胶东半岛大致位于南北分界线以北, 受夏季风影响较小, 为典型的温带季风性气候。夏季高温多雨, 降水集中, 雨水下渗快, 不易保存; 冬季寒冷干燥。厄尔尼诺现象的出现会在一定程度上加重南涝北旱的情况, 也是造成胶东半岛旱情加重的主要

原因。

4 结论

采用降水量距平百分率作为干旱指标, 识别出的不同等级干旱发生时间与干旱实际发生时间基本吻合。从干旱发生的季节来看, 具有明显的季节性特点, 出现季节性连旱的现象。

根据云模型的数字特征及云图分布特征, 判断出: 在年尺度上, 干旱的确定性比较容易识别, 干旱分布最不均匀, 稳定性也最低; 在季尺度上, 冬、秋季干旱分布的模糊性和随机性较大, 冬季干旱分布的确定性最难以度量。秋季干旱分布的不均匀性最稳定, 夏季最不稳定。

从干旱发生的空间规律来看: 鲁西北地区最容易发生干旱、严重干旱和特大干旱; 胶东半岛易发生轻度干旱; 鲁中地区易发生中度干旱。从干旱分布的模糊性和随机性来看, 鲁西北地区最大, 鲁西南地区最小。从干旱分布的稳定性和均匀性上分析可知, 鲁西北地区干旱分布的稳定性最强, 均匀

性最好。

春旱和冬旱基本上呈现由西北向东南递减的趋势。夏季干旱发生的频次相比其他3个季节偏低,东营市发生夏旱的频次最高。秋季旱情比较严重,除烟台市部分地区外,其他地区旱情都比较严重。在年尺度上表现为鲁西北地区发生干旱的概率最高。

参考文献:

- [1] BONGAARTS J. Special report on climate change and land use. Intergovernmental panel on climate change, 2018[J]. *Population and Development Review*, 2019, 45(4): 936-937. DOI: 10.1111/padr.12306.
- [2] 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. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0029.
- [3] HOYLMAN Z H, BOCINSKY R K, JENCISO K G. Drought assessment has been outpaced by climate change: empirical arguments for a paradigm shift[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 2715.
- [4] SHI J, CUI L L, TIAN Z. Spatial and temporal distribution and trend in flood and drought disasters in east China[J]. *Environmental Research*, 2020, 185: 109406. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109406.
- [5] 王洁, 李王成, 李晨, 等. 基于SPI指数的宁夏干旱特征[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(3): 528-538. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0056.
- [6] 黄进, 王锦旗, 张方敏. 基于H-P滤波的我国粮食主产区农业干旱时空特征解析[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(9): 18-22. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2022.20220477.
- [7] 高祖桥, 白永平, 周亮, 等. 宁夏沿黄城市带湿地景观格局演变特征及驱动力[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(10): 3499-3508. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202010.013.
- [8] HOQUE M A, PRADHAN B, AHMED N, et al. Agricultural drought risk assessment of Northern New South Wales, Australia using geospatial techniques[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 756: 143600. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143600.
- [9] WEST H, QUINN N, HORSWELL M. Remote sensing for drought monitoring & impact assessment: Progress, past challenges and future opportunities[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 111291. DOI: 10.1016/j.res.2019.111291.
- [10] 毛文静, 姜田亮, 栗晓玲. 黄河流域河流生态干旱指数构建及生态干旱演变规律[J]. *人民黄河*, 2022, 44(10): 71-77.
- [11] 李端, 司建华, 李继彦, 等. 胡杨(*Populus euphratica*)对盐胁迫和干旱胁迫的生理响应特征[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(2): 205-215.
- [12] 徐泽华, 韩美. 山东省干旱时空分布特征及其与ENSO的相关性[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(8): 1236-1248. DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.171024.
- [13] 孙才志, 靳春玉, 郝帅. 黄河流域水资源-能源-粮食纽带关系研究[J]. *人民黄河*, 2020, 42(9): 101-106.
- [14] 山东省统计局, 国家统计局山东调查总队. 山东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [15] 任建成, 王峰, 卢晓宁. 基于SPEI的山东省干旱时空变化特征及趋势分析[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(12): 127-135. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2021310.
- [16] 葛鲁亮, 金菊良, 宁少尉, 等. 基于遥感有序加权平均干旱指数的山东省干旱动态分析[J]. *灾害学*, 2020, 35(3): 172-178, 229. DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.03.033.
- [17] 王正东, 郭鹏, 万红, 等. 基于MODIS数据的山东省2014—2016年干旱监测分析[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 330-336. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2019.02.047.
- [18] 杜贞栋, 李福林, 范明元, 等. 山东省水资源可持续利用研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2011.
- [19] 余嘉茵, 何玉林, 崔来中, 等. 针对大规模数据的分布一致缺失值插补算法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2023, 63(5): 740-753. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2023.25.003
- [20] 熊巍, 王娟, 潘晗, 等. 多重稳健的高维缺失数据插补研究[J]. *统计与信息论坛*, 2023, 38(2): 3-15.
- [21] 国家气候中心. 气象干旱等级: GB/T 20481—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [22] 周子英, 黄毅. 基于可拓云模型的精准扶贫绩效评价[J]. *统计与决策*, 2022, 38(20): 67-71. DOI: 10.13546/j.cnki.tjyj.2022.20.013.
- [23] 周洪文, 董文君, 周本涛. 基于二维云模型的尾矿库溃坝破坏性研究[J]. *工业建筑*, 2022, 52(10): 229-235. DOI: 10.13204/j.gyjzG22072610.
- [24] 金菊良, 李辉, 李靖, 等. 基于云模型的安徽省干旱时空分布特征分析[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(4): 1-5.
- [25] 赵辉, 王玥, 张旭东, 等. 基于云模型的特色小镇PPP项目融资风险评价[J]. *土木工程与管理学报*, 2019, 36(4): 81-88. DOI: 10.13579/j.cnki.2095-0985.2019.04.013.
- [26] BAIKLOY E, PRANEETPOLGRANG R, JIRAWI-CHITTHAI N. Development of cyber resilient capability maturity model for cloud computing services[J]. *TEM Journal*, 2020, 9(3): 915-923.
- [27] 马天行, 林允, 周晓斌, 等. 煤层底板突水危险性预测的熵权-正态云模型[J]. *中国安全科学学报*,

- 2022,32(S1):171-177.DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2022.S1.0445.
- [28] 冯春燕. 山东省旱灾社会脆弱性研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2017.
- [29] 温克刚, 翟武全. 中国气象灾害大典·山东卷[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [30] 任建成, 王峰, 卢晓宁. 基于EOF和小波分析的山东省年降水时空变化特征[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 179-183. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2022.02.030.

Characteristics of temporal-spatial drought distribution in Shandong Province based on cloud model

CUI Sufang¹, ZHANG Baoxiang², RONG Yanni¹, JIANG Xin², WANG Zhen¹, LIU Zhen¹, FU Jun¹

(1. *Shandong Agriculture and Engineering University, Jinan 250100, China*;

2. *Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250014, China*)

Abstract: With the acceleration of global warming and frequent occurrence of agricultural natural disasters, drought has become an important restrictive factor for agricultural production in Shandong Province and has caused huge losses to agriculture. As an important region of the national ecological protection and high-quality development strategy in the Yellow River basin, the high-quality development of ecological agriculture is particularly important in Shandong Province, and drought is one of the limiting factors affecting the high-quality development of ecological agriculture. So the study of drought is becoming more and more important. In recent years, there have been more and more research on extreme drought monitoring, risk assessment models and systems, and a variety of meteorological hydrological drought index models have been widely used. The precipitation anomaly percentage model is superior to the other drought index models because it can directly reflect the drought caused by precipitation. Although some research has been conducted in recent years on temporal-spatial drought distribution, there are few researches on the fuzziness, randomness and unevenness of drought distribution.

Based on the measured data of meteorological data from 1951 to 2017 in 29 meteorological stations in Shandong Province, the precipitation anomaly percentage is used as the evaluation index of meteorological drought grade, the cloud model is used to study the uniformity and stability characteristics of the drought spatial and temporal distribution in Shandong Province and the inverse distance weighting method is used to analyze the spatial distribution characteristics of drought frequency at different time scales.

Results showed that: the precipitation anomaly percentage in Shandong Province shows a downward trend of fluctuation year by year, but the decreasing trend was not obvious; the occurrence of drought has obvious seasonality, showing the phenomenon of seasonal continuous drought. On the time scale, the ambiguity and randomness of the drought distribution on the annual scale are smaller than the seasonal scale, the determinism of the drought is easier to measure than the seasonal scale, and the stability of the unevenness of distribution is low; the comparison of the numerical characteristics of the inter-seasonal cloud shows that the distribution of winter and autumn droughts has been relatively vague and random over the years, and the certainty of winter drought distribution is the most difficult to measure. In terms of stability, autumn is the most stable, followed by spring, and the most unstable is summer.

On the spatial scale, the frequency of drought, severe drought and extreme drought in the northwestern Shandong area is the highest; the frequency of mild drought in the Jiaodong Peninsula area is the highest, followed by the southern Shandong area; the frequency of moderate drought is the highest in middle Shandong Province, followed by south Shandong Province. The stability of drought distribution was judged by the value of super-entropy, which showed that the northwest of Shandong was the most stable, the middle of Shandong was the second, and the Jiaodong Peninsula was the most unstable. Based on the analysis of the uniformity of drought distribution, it is concluded that the drought distribution in southwest Shandong is the most uneven, and that the drought distribution in northwest Shandong is the most balanced. The spatial distribution of drought frequency in Shandong Province showed that spring drought and winter drought decreased from northwest to southeast, and autumn drought was more serious. The cloud model has a good application prospect for drought distribution in subhumid area.

Key words: drought; precipitation anomaly percentage; homogeneity; stability; cloud model