DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2020. 05. 008

基于 PDSI 的 1982—2015 年我国气象干旱特征及 时空变化分析

然^{1,2},张 珂^{1,2,3}

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210098; 2.河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室,江苏 南京 210098)

摘要:利用中国地面气象观测的月值资料构建 1982-2015 年月尺度帕默尔干旱指数(PDSI)来度 量中国气象干旱,并对气象干旱特征和时空变化规律进行分析。结果表明:我国气象干旱特征空间 差异显著,半湿润、半干旱区平均干旱历时较长,烈度较大;从全国整体来看,单位面积上干旱频率 为 0.44 次/a, 平均干旱历时 6 月/次。气象干旱特征变化明显, 干旱频次、历时和烈度呈上升趋势, 半湿润、半干旱区干旱形势逐渐严峻。气象干旱时空变化显著,年际性、季节性 PDSI 均呈下降趋 势,气象干旱总体呈加重趋势,集中在半湿润、半干旱区(青海东南部、陕甘宁、山西、内蒙古北部及 黑龙江北部区域),部分湿润区(四川中部、重庆、湖北及云贵地区)气象干旱加重趋势同样显著。 关键词:帕默尔干旱指数:气象干旱:干旱特征:干旱识别:时空变化:Sen 趋势度:游程理论 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)05-0050-07 中图分类号:P426.616

PDSI-based analysis of characteristics and spatiotemporal changes of meteorological drought in China from 1982 to 2015 // TAO Ran^{1,2}, ZHANG Ke^{1,2,3} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. CMA-HHU Joint Laboratory for HydroMeteorological Studies, Nanjing 210098, China)

Abstract: A monthly Palmer Drought Severity Index (PDSI) from 1982 to 2015was constructed using the monthly data from China's surface meteorological observation to measure meteorological drought in China. The characteristics and spatiotemporal changes of meteorological drought were analyzed. The results show that there are significant spatial differences in the characteristics of meteorological drought in China with long average droughtduration and high intensityin semi-humid and semi-arid regions. Across the country as a whole, the drought frequency per unit area is 0.44 times per year and the average drought duration is 6 months per time. The characteristics of meteorological drought have changed significantly and the frequency, duration and intensity of drought present an upward trend. The drought situation in semihumid and semi-arid regions has gradually become severe. The meteorological drought has significant spatiotemporal changes with interannual and seasonal PDSI all showing a downward trend. The meteorological drought is generally aggravating concentrated in semi-humid and semi-arid regions such as Southeastern Qinghai, Shaanxi-Gansu-Ningxia, Shanxi, Northern Inner Mongolia and Northern Heilongjiang. In some humid regions such as Central Sichuan, Chongqing, Hubei, and Yunnan-Guizhou areas, the trend of aggravation is also significant.

Key words: PDSI; meteorological drought; drought characteristics; drought identification; spatiotemporal changes; Sen's slope; run theory

气象干旱是其他类型干旱发生的先导因素[1]。 及时采取措施,河湖水资源量、土壤含水量会相应减 当降水量在一定时期持续少于正常状态时,如果不 少[2],引起干旱,甚至造成社会经济损失,因此研究

基金项目:"十三五"国家重点研发项目(2018YFC1508101);江苏省杰出青年基金(BK20180022);江苏省"六大人才高峰"项目(NY-004); 江苏省水利科技项目(2018055)

作者简介;陶然(1996—),女,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail; rantao@ hhu. edu. cn

通信作者:张珂,教授。E-mail: kzhang@ hhu. edu. cn

我国气象干旱具有重要的意义。

Dai^[3]认为全球气象干旱呈增加趋势。国内不少学者的研究也表明,1960年以来,我国气象干旱程度在加重,干旱范围也在增加^[4-5]。因此,研究我国的干旱时空变化及特征规律具有重要意义^[6]。通常认为,干旱主要发生在我国北方,南方是较为湿润的地区,因此干旱风险较低。Shi 等^[7]发现,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。已有研究^[8-9]表明,干旱不仅发生在干旱区和半干旱区,湿润区和半湿润区也常发生干旱。当前已有的研究大多仍以我国北方干旱区为主要研究区域^[10-14],往往忽视湿润地区的干旱研究,且较少涉及全国范围尺度^[15]。

降水持续偏少是气象干旱最主要的特征,因此, 许多常用的气象干旱指数都以降水量为唯一考虑要 素并按不同原理计算得到[16],如降雨十分位指数 RD、标准化降水指数 SPI 等。但仅仅考虑降水会影 响衡量气象因素对干旱过程影响的准确性。1965 年 Palmer [17] 建立了帕默尔干旱指数 (Palmer drought severity index, PDSI), 该指数考虑了土壤水分以及 蒸散发,相较于其他气象干旱指数,PDSI物理意义 清晰明确,是研究和监测气象干旱应用最为广泛的 指标之一。在很多学者的努力下, PDSI 也成为一个 成熟的、易获取的干旱指数。目前已有研究者建立 了全球尺度的 PDSI 数据库[18],但空间分辨率较低, 如何获取我国地区较高分辨率的 PDSI 数据仍需进 一步研究。本文使用我国地面气候资料月值数据集 的降水、气温数据构建 1982—2015 年全国 0.25°分 辨率的网格化月尺度 PDSI 指数,分区研究气象干旱 特征,包括干旱频次、历时与烈度及其变化特征,并 分析气温及降水变化对气象干旱时空变化的影响. 以期为我国干旱研究提供参考。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

本文的气象数据来自中国地面气候资料月值数据集(http://data.cma.cn/)。利用全国 613 个气象观测站(图 1)的降雨、气温资料,时间上,少量缺失数据采用线性插补;空间上,采用克里金方法插值为网格数据,得到 1982—2015 年空间分辨率 0. 25°×0. 25°的全国月尺度降水、气温数据。我国地域辽阔,本文为了简化分区研究的难度,对具有不同气候特征的区域进行气象干旱的对比评价,依据多年平均降水量将我国划分成四大气候区,大于800 mm 为湿润区、400~800 mm 为半湿润区、200~400 mm 为半干旱区、小于200 mm 为干旱区。

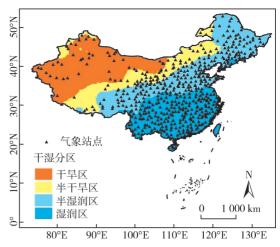


图 1 干湿分区及气象站点分布

Fig. 1 Distribution of dry and wet areas and meteorological stations

本文使用 Dai 等^[19]制作的面向陆面过程模型的中国土壤水文数据集(http://westdc. westgis. ac. cn/)的田间持水量和凋萎系数计算土壤有效含水量(available water capacity, AWC),作为 PDSI 的输入。使用 Dai^[18]利用观测地面气温及降水数据建立的全球 2.5°×2.5°(简称 DAI-scPDSI)以及英国East Anglia 大学气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU)构建的全球 0.5°×0.5°月尺度自校正PDSI 数据库(简称 CRU-scPDSI)来验证本文构建的全国 0.25°×0.25°PDSI 的可靠性。

1.2 研究方法

1.2.1 PDSI 的计算方法

PDSI 基于一个简易的两层土壤水分收支模型,综合考虑了温度、降水及下垫面的影响,其中温度的影响通过蒸发表现,下垫面通过 AWC 表现。关于PDSI 的具体算法可参考文献[18]。PDSI 构建的主要输入参数为降水、气温和 AWC,基于水量平衡原理建立水平衡方程,计算水分距平 d:

$$d = P - \overline{P} = P - (\alpha P_{\rm E} + \beta P_{\rm R} + \gamma R_{\rm RO} - \sigma P_{\rm L})$$
(1)

式中:P 为实际降水量;P为气候适宜降水量; P_E 为潜在蒸散量,本文蒸发的估算采用 Thornthwaite [20] 方法; P_R 为土壤潜在供给量; P_R 0为潜在径流量; P_L 为土壤潜在失水量; α 、 β 、 γ 、 σ 分别为蒸散系数、土壤水供给系数、径流系数和土壤水损失系数。

水分距平 d 与该地某月的气候权重系数 ω 相乘,得到水分异常指数,进而计算出 PDSI:

$$I_{\text{PDSI}} = 0.897 I_{\text{PDSI-1}} + Z_i / 3$$
 (2)

式中: I_{PDSI} 为当月 PDSI; I_{PDSI-1} 为上一个月 PDSI,首月指数值为 $Z_1/3$; Z_i 为当月水分异常指数。

本文使用美国内布拉斯-林肯大学发布的 PDSI

计算程序(http://nadss. unl. edu),将 1980—1981 年作为模型预热期,预热后输出 1982—2015 年的结果。PDSI 干旱等级划分标准见表 1。

表 1 干湿等级划分

Table 1 Classification of wet and dry grades

PDSI	干湿等级	PDSI	干湿等级
≥4	极端湿润	(-1,1)	正常
[3,4)	严重湿润	(-2,-1]	轻微干旱
[2,3)	中等湿润	(-3,-2]	中等干旱
[1,2)	轻微湿润	(-4,-3]	严重干旱
		≤ -4	极端干旱

1.2.2 Mann-Kendall 检验及 Sen 趋势度

Mann-Kendall 趋势检验是目前气象水文领域进行趋势判断的主要方法,依据检验统计量 Z 判断序列的趋势显著性。在显著性水平 $\alpha=0.05$ 时、当检验统计量 |Z|>1.96 时表示趋势显著; 当 |Z|<1.96 时表示趋势不显著。

Sen 趋势度检验是由 $Sen^{[21]}$ 提出的研究变量长时序变化的方法,对于一时间序列 x_1, x_2, \cdots, x_N , 趋势度 β 定义为

$$\beta = \operatorname{Median}\left(\frac{x_{j} - x_{i}}{j - i}\right) \quad (i = 1, 2, \dots, N - 1; j > i)$$
(3)

式中: x_j 和 x_i 分别为不同时刻下的时间序列值; Median 为中位数函数。当 $\beta > 0$ 时表示待分析变量的时间序列呈上升趋势,当 $\beta < 0$ 时表示待分析变量的时间序列呈下降趋势。

1.2.3 干旱识别过程

游程理论是分析时间序列的一种方法,广泛应 用于干旱事件的识别中[22]。传统的干旱事件识别 过程并没有考虑将一些历时很短的"小干旱事件" 的影响忽略不计,也没有将间隔时间很短的两次历 时很长的"强干旱事件"的影响合并,这样容易降低 干旱过程识别的精确度。本文利用 He 等^[23]提出的 一种包含3个阈值的改进游程理论方法优化干旱识 别过程。以图 2 为例,主要步骤如下:首先按照干旱 发生阈值 R_1 初步确定干旱事件,由此可以预选 a_xb_x c、d、e 5 次干旱事件;第二步为剔除,若干旱事件历 时 1 个月且未达到中度干旱阈值 R_{γ} ,则剔除该次干 旱事件,由此可剔除 a 事件;第三步为合并,若相邻 两次干旱事件间隔1个月且间隔月的指数值小于湿 润状态阈值 R_0 ,则将这两次干旱合并成一次干旱, 由此可以将 b、c 两次干旱合并成一次干旱。本文中 3 个阈值依据指数干湿等级划分标准选取,以 PDSI 的干湿等级划分(表 1)为标准,阈值 R_0 为发生轻微 湿润值(1),阈值 R_1 为发生轻微干旱值(-1),阈值 R_2 为发生中度干旱值(-2)。

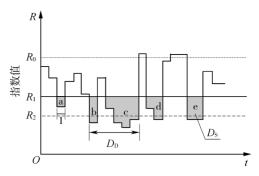


图 2 3 个阈值干旱识别

Fig. 2 Three threshold drought recognition

依据上述方法识别干旱过程,并定义干旱频次 (drought frequency, $D_{\rm F}$) 为干旱发生的次数,干旱历时(drought duration, $D_{\rm D}$) 为一次干旱事件的时间跨度(月),干旱烈度(drought severity, $D_{\rm S}$) 为一次干旱事件中所有指数值的绝对值之和。

假设一次干旱事件开始时间为 t_s , 结束时间为 t_e , 时间为 i 的指数值为 I_i 。对于该次干旱事件,干旱历时 $D_{\rm D}$ 和干旱烈度 $D_{\rm S}$ 计算公式为

$$D_{\rm D} = t_{\rm e} - t_{\rm s} \tag{4}$$

$$D_{\rm S} = \sum_{i=t_{\rm S}}^{t_{\rm e}} \left| I_i \right| \tag{5}$$

2 结果与分析

2.1 与 DAI-scPDSI、CRU-scPDSI 的比较

为了验证构建的全国 0.25°逐月 PDSI 的适用性,将其与目前运用较多的两个 PDSI 数据库(DAIscPDSI、CRU-scPDSI)进行比较,3 种 PDSI 计算数据源(降水、气温、AWC)在表 2 中列出。为了方便研究,提取 1982—2014 年中国区域的 DAI-scPDSI 和CRU-scPDSI,并将其空间插值至 0.25°分辨率,与本研究 PDSI 比较。

图 3 为 3 种 PDSI 全国平均月尺度变化,可以看出,本文 PDSI 与 DAI-scPDSI、CRU-scPDSI 月尺度变化基本一致,1982—1995 年本文 PDSI 较其他两个 PDSI 略高,1996—2010 年三者较为相近,2011—2014 年本文 PDSI 低于其他 2 个 PDSI。本研究 PDSI 与 DAI-scPDSI 和 CRU-scPDSI 的相关系数分别为 0.66 和 0.79,相关性较高,说明本文计算的

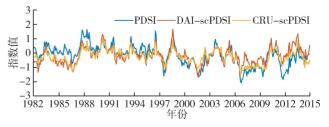


图 3 3 种指数月尺度变化

Fig. 3 Monthly changes of the three indices

Table 2 Comparison of three PDSI calculated data

 类别	数据	空间分辨率	时间范围	来源
DAI-scPDSI	降水	2. 5° ×2. 5°	1850—2014 年	Dai ^[18] ;GPCP 数据等
	气温	5° ×5°	1850—2014年	CRUTEM3 数据等
	AWC	1° × 1°		$\mathrm{Webb}^{[24]}$
CRU-scPDSI	降水、气温	0. 5° × 0. 5°	1901—	CRU TS3 数据等
	AWC	5° ×5°		FAO
本文 PDSI	降水、气温	0. 25° × 0. 25°	1982—2015 年	国家气象信息中心
	AWC	0. 008 3 $^{\circ}$ × 0. 008 3 $^{\circ}$		Dai ^[19]

PDSI 在中国区域具有较强的可靠性。

图 4 为本文 PDSI 与 DAI-scPDSI、CRU-scPDSI 相关系数的空间分布图。总体而言,本文 PDSI 与 DAI-scPDSI、CRU-scPDSI 在我国东部季风区(108° E 以东地区)、云南及新疆西北部地区相关性较高(相关系数 r > 0.7),而在青藏高原、内蒙古以西地区相关性较低(r < 0.5)。

由于中国青藏高原和内蒙古地区气象站点空间密度较低,可能导致该地区数据的不准确和不确定性增大。总体而言,本文 PDSI 数据同其他两个不同数据源数据一致性较高,相互可以作为印证。由于本文采用中国气象局提供的全国范围的观测气象数据,在数据覆盖密度和精度上应该优于其他两个数据源,因此有理由认为本文获得的 PDSI 应该更能反映中国的实际情况。

2.2 气象干旱特征

2.2.1 干旱频率、历时与烈度

为了研究气象干旱的不同指标特征,对 PDSI 进行 $D_{\rm F}$ 、 $D_{\rm D}$ 、 $D_{\rm S}$ 这 3 个干旱特征指标的分析,并利用多年平均降水量划分我国干湿区(图 1),分区研究干旱特征。表 3 为分区干旱特征统计。从整体来看,1982—2015 年单位面积上我国气象干旱平均频率为 0. 44 次/a,平均干旱历时 6 月/次(包含轻微干旱)。我国气象干旱特征情况分布不均,半湿润、半

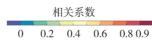
干旱区虽然干旱频率较小(分别为 0.38 次/a 和 0.41 次/a),但平均每次干旱历时较长(分别为每次 8 个月和 6 个月),且烈度较大;湿润、干旱区干旱次数较多(分别为 0.44 次/a 和 0.50 次/a),但平均历时较短(5 月/次),烈度较低。

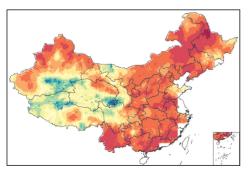
表 3 1982—2015 年分区干旱特征统计 Table 3 Statistics of regional drought characteristics from 1982 to 2015

区域	D_{F} /次	D _D /(月・次 ⁻¹)	D_{S}
湿润区	15	5	7. 2
半湿润区	13	8	12. 5
半干旱区	14	6	10.0
干 旱 区	17	5	8.8

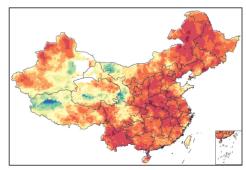
2.2.2 干旱特征时间变化

为了进一步分析 3 种干旱特征的时间变化,将 1982—2015 年分成 7 个时段(1982—1985 年、1986—1990 年、1991—1995 年、1996—2000 年、2001—2005 年、2006—2010 年、2011—2015 年,图 5、6 中记为时段 1,2,3,4,5,6,7),计算全国各时段的干旱总频率、历时及干旱烈度(图 5)。由图 5 可知, 1982—2015 年单位面积上我国干旱频率、干旱历时、干旱烈度总体都有上升的趋势。虽然干旱历时与烈度的变化过程相似性很高,但干旱频率与它们并不是同步变化的,如,1986—1990 年在干旱历时与烈度都在减小的同时,干旱频率却在增大;





(a) PDSI 与 DAI-scPDSI 的相关关系



(b) PDSI 与 CRU-scPDSI 的相关关系

图 4 相关系数空间分布

Fig. 4 Distribution of the correlation coefficient

具体来看,1996—2000 年以及 2006—2010 年这两个时段内,干旱频率、干旱历时及烈度都呈同步上升。

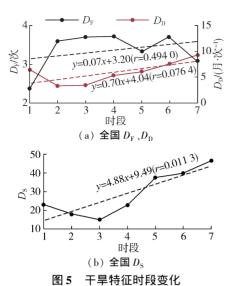


Fig. 5 Changes of drought characteristics in different periods

从干旱特征分区变化(图 6)来看,1982—2015年我国半湿润、半干旱区的气象干旱的干旱频率、干旱历时、干旱烈度总体都有上升的趋势。湿润区的干旱频率虽然有下降的趋势,但干旱历时、干旱烈度都逐渐上升,尤其是 2011—2015 年这一时段,湿润区的干旱历时、干旱烈度上升速率较大。干旱区的干旱频率虽在增加,但干旱历时、烈度有轻微下降的

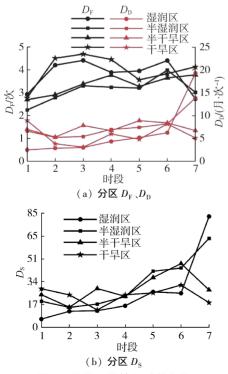


图 6 分区干旱特征时段变化

Fig. 6 Changes of regional drought characteristics in different periods

趋势。另外,我国湿润、半湿润区、半干旱区的干旱 烈度上升速率明显高于干旱区。

马鹏里等[5]发现 1960 年以来,中国各区域干旱程度加重,次数增多,持续时间增长。果华雯等[25]研究发现,我国南北过渡带的干旱强度、干旱历时随时间均呈上升趋势。贾艳青等[26]研究表明,我国气象干旱严重程度高的地区集中在半湿润及半干旱区的交界处,以内蒙古东部及华北地区为主。说明我国气象干旱频次增多、历时增加、烈度加重,尤其是在半湿润、半干旱区,这些与本文的结果基本一致。

2.3 气象干旱时空变化

本文 PDSI 的年际及季节(春:3—5月,夏:6—8月,秋:9—11月,冬:12月至次年2月)尺度时间变化(图7)。结果表明,1982—2015年,全国年际PDSI 整体以每年0.03的速率下降,说明我国气象干旱程度总体在加重。1982—1998年 PDSI 并没有达到轻微干旱的标准,然而 2000—2002年及2006—2008年 PDSI 持续低于轻微干旱的标准,说明该时段全国气象干旱加重明显,2012—2015年气象干旱有减轻的趋势。季节变化上,与年际变化相似,全国 PDSI 整体呈下降趋势,从 2000年后,气象干旱加重明显,季节之间变化差异不大。

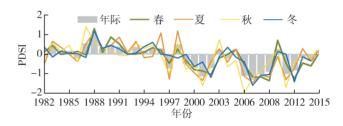


图 7 PDSI 年际、季节性时间变化 Fig. 7 Temporal variation of interannual and seasonal PDSI

逐网格点计算年际、季节尺度 PDSI 的 Sen 趋势度,并对其进行 Mann-Kendall 趋势检验(图 8),图 8(a)表明,我国年尺度气象干旱整体有加重的趋势,主要集中在半湿润、半干旱区,较为严重的有青海东南部、陕甘宁、山西、内蒙古北部及与黑龙江省交界处等地区。湿润地区中,四川中部、重庆、湖北及云贵地区也有大面积的干旱加重趋势。图 8(b)~(e)表明,季节性气象干旱在半湿润、半干旱区均有显著加重趋势,其中,夏季干旱有显著加重趋势的地区占比最大(24%),冬季干旱有显著减轻趋势的地区占比最大(2%)。

3 结 论

a. 我国气象干旱特征空间差异显著。半湿润、

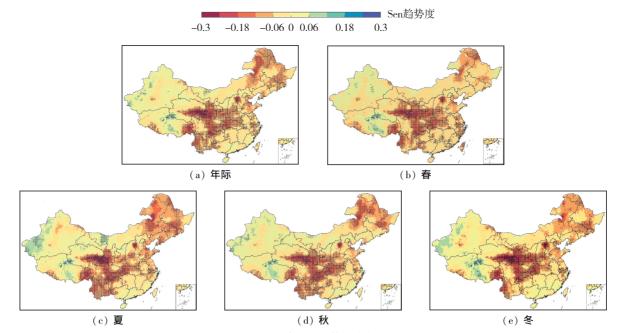


图 8 PDSI 年际、季节性空间变化

Fig. 8 Spatial variation of interannual and seasonal PDSI

半干旱区干旱频率较小,但平均干旱历时较长,且烈度较大;湿润、干旱区干旱次数较多,但平均历时较短,烈度较低。从全国整体来看,单位面积上干旱频率为0.44次/a,平均干旱历时为每次6月/次。

- b. 气象干旱特征变化明显,半湿润、半干旱区干旱形势逐渐严峻。1982—2015年我国干旱频率、平均干旱历时、干旱烈度总体都有上升的趋势,尤其是在半湿润、半干旱区。湿润、半湿润区、半干旱区的干旱烈度上升速率明显高于干旱区。
- c. 气象干旱时空变化显著。时间上,无论是年际还是季节变化,全国单位面积 PDSI 均呈下降趋势,2000 年后气象干旱程度加重明显,季节之间变化差异不大。空间上,半湿润、半干旱区气象干旱程度有显著加重的趋势,较为严重的有青海东南部、陕甘宁、山西、内蒙古北部及与黑龙江省交界处等地区。湿润地区中,四川中部、重庆、湖北及云贵地区也有大面积的气象干旱程度加重趋势。

参考文献:

- [1] 袁文平,周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展,2004(6):982-991. (YUAN Wenping, ZHOU Guangsheng. Theoratical study and research prospect on drought indices [J]. Advances in Earth Science,2004(6):982-991. (in Chinese))
- [2] 屈艳萍,郦建强,吕娟,等. 旱灾风险定量评估总体框架及其关键技术[J]. 水科学进展,2014,25(2):297-304.
 (QU Yanping, LI Jianqiang, LYU Juan, et al. A quantitative framework for assessing drought disaster risk and key techniques [J]. Advances in Water Science,

2014,25(2):297-304. (in Chinese))

- [3] DAI A. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. Nature Climate Change, 2013,3(1):52-58.
- [4] 栗健,岳耀杰,潘红梅,等. 中国 1961—2010 年气象干旱的时空规律:基于 SPEI 和 Intensity analysis 方法的研究[J]. 灾害学,2014,29(4):176-182. (LI Jian, YUE Yaojie, PAN Hongmei, et al. Variation rules of meteorological drought in China during 1961-2010 based on SPEI and intensity analysis [J]. Journal of Catastrophology,2014,29(4):176-182. (in Chinese))
- [5] 马鹏里,韩兰英,张旭东,等. 气候变暖背景下中国干旱变化的区域特征[J]. 中国沙漠,2019,39(6):209-215. (MA Pengli, HAN Lanying, ZHANG Xudong, et al. Regional characteristics of drought in China under the background of climate warming [J]. Journal of Desert Research,2019,39(6):209-215. (in Chinese))
- [6] 张林燕,郑巍斐,杨肖丽,等.基于 CMIPS 多模式集合和 PDSI 的黄河源区干旱时空特征分析[J]. 水资源保护, 2019,35(6):95-99. (ZHANG Linyan, ZHENG Weifei, YANG Xiaoli, et al. Temporal-spatial characteristics of drought in source region of Yellow River based on CMIP5 multi-mode ensemble and PDSI [J]. Water Resources Protection,2019,35(6):95-99. (in Chinese))
- [7] SHI B, ZHU X, HU Y, et al. Drought characteristics of Henan province in 1961-2013 based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(3):311-325.
- [8] 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, 2019,39(5):1-10. (HAN Lanying, ZHANG Qiang, JIA

- Jianying, et al. Drought severity, frequency, duration and regional differences in China [J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(5):1-10. (in Chinese))
- [9] 荣艳淑,巩琳,卢寿德. 云南 2009—2014 年持续性气象 水文干旱特征及成因分析[J]. 水资源保护,2018,34 (3):22-29. (RONG Yanshu, GONG Lin, LU Shoude. Analysis on characteristics and causes of persistent meteorological and hydrological drought in Yunnan from 2009 to 2014[J]. Water Resources Protection, 2018,34 (3):22-29. (in Chinese))
- [10] 李明,王贵文,柴旭荣,等. 基于空间聚类的中国东北气候分区及其气象干旱时间变化特征[J]. 自然资源学报,2019,34(8):1682-1693. (LI Ming, WANG Guiwen, CHAI Xurong, et al. Climate regionalization and temporal evolution of meterological drought in Northeast China based on spatial clustering [J]. Journal of Natural Resouces,2019,34(8):1682-1693. (in Chinese))
- [11] 粟晓玲,梁筝. 关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征[J]. 水资源保护,2019,35(4):17-23. (SU Xiaoling, LIANG Zheng. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Chuanzhongarea [J]. Water Resources Protection, 2019,35(4):17-23. (in Chinese))
- [12] 史尚渝,王飞,金凯,等. 基于 SPEI 的 1981—2017 年中 国北方地区干旱时空分布特征[J]. 干旱地区农业研 究,2019,37(4):215-222. (SHI Shangyu, WANG Fei, JIN Kai, et al. Temporal and spatial characteristics of drought based on SPEI in Northern China from 1981 to 2017[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2019, 37(4):215-222. (in Chinese))
- [13] 周丹,张勃,任培贵,等. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50 a 干旱特征分析[J]. 自然资源学报,2014,29 (4):677-688. (ZHOU Dan, ZHANG Bo, REN Peigui, et al. Analysis of drought characteristics of Shaanxi province in recent 50 years based on Standardized Precipitation Evapotranspiratian Index [J]. Journal of Natural Resources,2014,29(4):677-688. (in Chinese))
- [14] 慈晖,张强,白云岗,等. 标准化降水指数与有效干旱指数在新疆干旱监测中的应用[J]. 水资源保护,2015,31 (2):7-14. (CI Hui, ZHANG Qiang, BAI Yungang, et al. Application of standardized precipitation index and effective drought index in drought monitoring in Xinjiang [J]. Water Resources Protection,2015,31(2):7-14. (in Chinese))
- [15] 杨帅,于志岗,苏筠. 中国气象干旱的空间格局特征 (1951—2011)[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(10): 54-60. (YANG Shuai, YU Zhigang, SU Yun. Spatial pattern of meteorological drought in China (1951-2011) [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014,28(10):54-60. (in Chinese))
- [16] 李忆平,李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进

- 展[J]. 干旱气象,2017,35(5):709-723. (LI Yiping, LI Yaohui. Advances in adaptability of meteorological drought indices in China[J]. Journal of Arid Meteorology,2017,35(5):709-723. (in Chinese))
- [17] PALMER W C. Meteorological drought [M]. Washington, D. C.: US Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.
- [18] DAI A. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900-2008 [J].

 Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116: D12115.
- [19] DAI Y, SHANGGUAN W, DUAN Q, et al. Development of a China dataset of soil hydraulic parameters using pedotransfer functions for land surface modeling [J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(3):869-887.
- [20] THORNTHWAITE C W. An approach toward a rational classification of climate [J]. Geographical Review, 1948, 38(1):55-94.
- [21] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63 (324):1379-1389.
- [22] 陈再清,侯威,左冬冬,等. 基于修订 Copula 函数的中国干旱特征研究[J]. 干旱气象,2016,34(2):213-222. (CHEN Zaiqing, HOU Wei, ZUO Dongdong, et al. Research on drought characteristics in China based on the revised Copula Function[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016,34(2):213-222. (in Chinese))
- [23] HE J, YANG X, LI Z, et al. Spatiotemporal variations of meteorological droughts in China during 1961-2014; an investigation based on multi-threshold identification [J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2016, 7 (1):63-76.
- [24] WEBB R S, ROSENZWEIG C E, LEVINE E R. Specifying land surface characteristics in general circulation models: Soil profile data set and derived water-holding capacities [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(1):97-108.
- [25] 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. (GOU Huawen, ZHANG Yuanwei, SONG Xiaoyan, et al. Temporal and spatial 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. (in Chinese))
- [26] 贾艳青,张勃. 近 57 年中国北方气候干湿变化及与太平洋年代际振荡的关系[J]. 土壤学报,2019,56(5): 1085-1097. (JIA Yanqing, ZHANG Bo. Relationship of dry-wet climate changes in Northern China in the past 57 years with Pacific Decadal Oscillation(PDO)[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56 (5): 1085-1097. (in Chinese))

(收稿日期:2020-02-23 编辑:彭桃英)