

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.018

基于短时间尺度自适应帕尔默干旱指数的 中国干旱演变特征分析

朱 烨¹, 靳鑫桐¹, 刘 懿², 郑丽虹², 张林齐², 王 文²

(1. 南京信息工程大学水文与水资源工程学院, 江苏 南京 210044;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:以帕尔默干旱指数(PDSI)为基础,构建融合Penman-Monteith潜在蒸散发公式且具有短时间尺度效应的自适应帕尔默干旱指数 $scPDSI_{pm}$,分析了1951—2016年中国旱涝演变趋势及干旱特征的空间分布规律和历史干旱事件的时空演变过程,并结合实际旱情记录资料验证了指数的可靠性。结果表明:空间上,中国东北、华北、华中、西北呈变旱趋势,西北和东南少数地区为变涝趋势;中国大部分地区旱情开始时间集中在6—7月,北部地区干旱历时长且干旱烈度大,南部地区干旱历时短、干旱烈度小; $scPDSI_{pm}$ 能够很好地指示旱情发生时间和区域,准确地捕捉到旱情中心的转移过程。

关键词:帕尔默干旱指数;蒸散发;短时间尺度;干旱演变特征;中国

中图分类号:P426.616 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)04-0124-07

Drought characteristics analysis in China based on self-calibrating Palmer drought severity index in a short time scale // ZHU Ye¹, JIN Xintong¹, LIU Yi², ZHENG Lihong², ZHANG Linqi², WANG Wen² (1. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the Palmer drought severity index (PDSI), a modified variant of the self-calibrating PDSI, which uses the Penman-Monteith equation for calculating the potential evapotranspiration and has a short time scale effect (denoted as $scPDSI_{pm}$), was proposed. The drying/wetting trends and drought characteristics of spatial distribution and temporal evolution of historical drought events in China during 1951-2016 were analyzed. The reliability of $scPDSI_{pm}$ is verified based on the recorded drought events. Results showed that, from the prospective of spatial distribution, there is a drying trend from the northeast of China, through north and central, to the southwest of China, while a wetting trend exists in the northwest and the southeast of China. For most regions in China, droughts likely start from June or July. Droughts in north China have long duration and high severity, whereas droughts in south China have short duration and low severity. The $scPDSI_{pm}$ is capable of capturing the onset time, affected area and migration process of drought.

Key words: Palmer drought severity index(PDSI); evapotranspiration; short time scale; drought characteristics; China

近年来,气候变化改变了水资源的时空分布格局,世界范围内干旱总体呈频次增高、影响范围扩大、旱情持续时间延长的发展态势^[1-2]。与此同时,社会经济快速发展,工农业及居民生活对水资源需求量逐年增加,河川径流量减少^[3-4],进一步加重了干旱风险。面对复杂的干旱情势,如何实现对旱情

发展过程的准确模拟及监测,是我国防旱抗旱工作亟待解决的问题。

干旱指数是旱情模拟、监测与评估最常用的工具。针对不同部门的用水需求及研究目的,目前已提出了上百种干旱指数^[5-6],帕尔默干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)是最典型

基金项目:国家自然科学基金(41901037,42171021,41971042);江苏省高等学校自然科学研究项目(19KJB170023);江苏省高等学校大学生创新创业训练计划(201910300264)

作者简介:朱烨(1987—),女,讲师,博士,主要从事干旱监测、模拟与预测等研究。E-mail:zhuye396@163.com

通信作者:刘懿(1988—),男,副教授,博士,主要从事干旱监测、模拟与预测等研究。E-mail:liuyihdx@126.com

的代表之一^[7-8]。PDSI 引入了气候适宜降水量 (climatically appropriate for existing conditions, CAFEC) 的概念用于表征区域水量的需求,以实际降水与 CAFEC 的差值反映某一地区特定时刻的水分异常状况,并采用考虑季节和前期累积效应的标准化过程对水分异常值进行校正,得到时空可比的干旱指数^[9]。相比于基于概率统计的标准化干旱指数如标准化降水蒸散发指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI), PDSI 同时考虑了降水、蒸散发、土壤水、径流等多个要素的异常,被认为是具有一定物理机制的干旱指数,在评估全球和区域干旱情势方面得到了广泛应用^[10]。PDSI 也存在一些缺陷,如采用 Thornthwaite 公式计算潜在蒸散发,导致高估气温对干旱的影响^[11]; PDSI 中的参数为根据特定气候区的气象、水文变量率定得到的经验性参数,直接应用于其他不同气候区易导致指数频率特征非正态化^[12]。此外, PDSI 时间尺度单一,仅适合用于评估长历时水文干旱^[13-14]。

针对上述问题,国内外学者在改善 PDSI 性能方面开展了一些研究工作。Wells 等^[15]提出了自适应帕尔默干旱指数 (self-calibrating PDSI, scPDSI), 可根据不同气候特征自动率定指数中的关键参数,提高了指数的时空可比性; van der Schrier 等^[16]将 Thornthwaite 公式替换为 Penman-Monteith 公式^[17]计算潜在蒸散发,改善了 PDSI 的模拟精度; Liu 等^[18]通过改进 PDSI 的标准化过程,拓展了指数的时间尺度,可用于评估气象、农业等较短时间尺度的干旱类型。由于 PDSI 原理和计算过程的复杂性,鲜有研究同时融合上述方案改进 PDSI,尤其是 PDSI 在短时间尺度方面的研究较少。鉴于此,本文在 scPDSI 的基础上,改进其蒸散发计算模块和标准化计算方法,构建融合 Penman-Monteith 潜在蒸散发公式的周尺度 scPDSI (scPDSI_{pm}) 来评估 1951—2016 年中国旱涝演变趋势,分析干旱历时、烈度、旱情开始时间等特征的空间分布规律,选取典型干旱事件追踪其时空演变过程,并结合实际旱情记录资料验证该指数的可靠性,以期为干旱监测与模拟研究提供参考。

1 研究数据

采用中国国家气象信息中心发布的国家级地面 756 个气象站 1951—2016 年基本气象要素逐日数据,包括降水、最高气温、最低气温、平均气温、风速、相对湿度、大气压和日照时数。对 756 个气象站气象要素的数据质量进行检查,修正由于站点迁移、仪

器及测量方式变化、时次变化等原因造成的数据非一致性问题。在此基础上,将逐日气象要素集成到周尺度用于 PDSI 计算。

除气象要素外,田间有效持水量 (available water capacity, AWC) 也是 PDSI 的重要输入参数。本文采用的 AWC 数据来自世界土壤数据库 HWSD 土壤数据集 V1.2,数据空间分辨率为 0.05°,其中中国区域的数据来源于中国科学院南京土壤研究所提供的 1:1 000 000 土壤数据。本文以气象站点的地理坐标为基准,采用各气象站点所在网格的 AWC 值进行 PDSI 计算。

2 研究方法

本文在 scPDSI 基础上,改进原指数中潜在蒸散发的计算模块和标准化过程中历时因子的推算方法,构建 scPDSI_{pm},并利用 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验方法和游程理论,分析 1951—2016 年中国旱涝演变趋势、干旱历时、烈度、旱情开始时间等特征的空间分布规律。

2.1 scPDSI_{pm}

scPDSI 的计算流程可分为水文账 (hydrologic accounting) 和标准化过程 (standard procedure) 两个部分。其中,水文账部分主要是利用一个简易水量平衡模型估算相关水文变量,并据此计算流域或区域水分的亏缺或盈余状况:

$$d = P - \bar{P} = P - (\alpha_i P_{ET} + \beta_i P_{RE} + \gamma_i P_R - \delta_i P_L) \quad (1)$$

式中: d 为水分的亏缺或盈余; P 为实际降水量; $\bar{P}$ 为气候适宜降水量; P_{ET} 、 P_{RE} 、 P_R 、 P_L 分别为潜在蒸散发量、土壤潜在补水量、潜在径流量、土壤潜在失水量; α_i 、 β_i 、 γ_i 、 δ_i 为各指标第 i 月 (周) 的权重因子。PDSI 和 scPDSI 均采用 Thornthwaite 公式计算潜在蒸散发,由于该公式以气温为输入变量,导致指数对气温敏感性高。FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式^[17]同时考虑了气温、湿度、风速、大气压、水汽压等多个气象要素,能够更好地表征大气能量的变化情况。鉴于此,本文以 Penman-Monteith 公式替换原指数中的 Thornthwaite 公式进行潜在蒸散发计算:

$$P_{ET} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

式中: R_n 为地表净辐射, MJ/(m·d); G 为土壤热通量, MJ/(m·d); T 为日平均气温, °C; e_s 、 e_a 分别为饱和水汽压及实际水汽压, kPa; Δ 为饱和水汽压曲线的斜率, kPa/°C; γ 为干湿表常数, kPa/°C; u_2 为 2 m

高度风速, m/s。

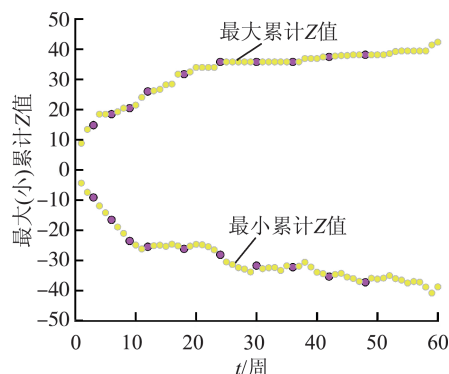
标准化过程对式(1)计算得到的 d 进行处理, 以增强指数的时空可比性。该过程涉及的主要参数包括气候特征系数和历时因子, 其中, 气候特征系数 K 主要用于对 d 进行季节和区域校正, 包括时程(或季节)校正系数 K_1 和空间校正系数 K_2 两项; 历时因子(p, q)本质上为前期和当月(周)水分亏缺的权重。图1为历时因子计算原理。scPDSI 通过构建不同月(周)滑动累计水分异常指数 Z 的最小值与相应累计滑动月(周)的线性关系计算历时因子, 拟合的直线代表极端干旱:

$$\sum_{i=1}^t Z_i = (mt + b)X_t/C \quad (3)$$

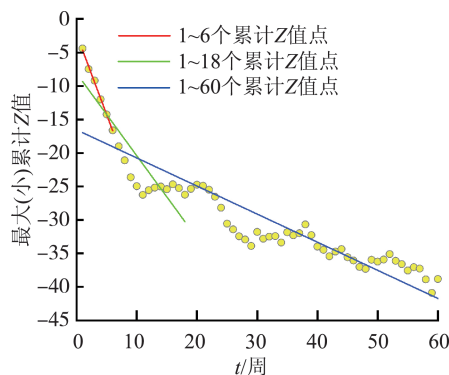
$$p = 1 - \frac{m}{m+b} \quad (4)$$

$$q = \frac{C}{m+b} \quad (5)$$

式中: m, b 分别为线性方程的截距和斜率; t 为滑动累计月(周)数; X_t 为对水分异常值进行时间尺度为 t 的滑动累计; C 为 $-1, -2, -3, -4$ 中的任一常数。scPDSI 选择 t 为 3、6、9、12、18、24、30、36、42 和 48 的累计 Z 最小值推求历时因子(图1(a)中黄色圆点), 其余最值点则忽略不计(图1(a)中紫色圆点)。Liu 等^[18] 研究发现, 选取不同累计 Z 值推算



(a) 不同时间尺度滑动累计 Z 值



(b) 滑动累计 Z 值线性拟合

图1 scPDSI 历时因子计算原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of scPDSI duration factor calculation principle

历时因子, PDSI 的时间尺度也会随之变化。具体而言, 当选取 $t = 1 \sim 60$ 个累计 Z 值点计算历时因子时, 得到的 scPDSI 时间尺度较长, 适用于表征水文干旱或地下水干旱; 选取 $1 \sim 10$ 个累计 Z 值点计算的 scPDSI 时间尺度较短, 可用于评估气象干旱。本文选取 $t = 1 \sim 10$ 个累积 Z 值点计算历时因子, 得到 scPDSI_{pm}, 用以分析干旱的时空演变特征。scPDSI_{pm} 干旱等级划分标准与 PDSI 一致, 即当 scPDSI_{pm} 取值为 $(-2, -1]$ 、 $(-3, -2]$ 、 $(-4, -3]$ 、 < -4 时, 分别对应于轻旱、中旱、重旱、极旱 4 个等级。

2.2 M-K 趋势检验

M-K 趋势检验是一种非参数检验方法, 该方法对待检测序列的分布无要求, 并且不受少数异常值的干扰^[19-20], 常用于干旱趋势分析。基于 scPDSI_{pm} 序列, 通过构造服从标准正态分布的统计变量分析旱涝趋势。若统计变量值为正, 表示序列呈上升趋势; 若统计变量值为负, 则序列呈下降趋势。在趋势检验中, 90%、95% 和 99% 显著性水平对应的统计变量的阈值分别为 1.65、1.96 和 2.57。

2.3 干旱特征提取

游程理论(又称阈值方法)常用于干旱事件识别和干旱特征提取。其基本原理为对某一时间序列 $\{x_t\}$, 通过给定阈值(或截取水平) x' , 将原序列划分为两类: 干旱事件($x_t < x'$)和非干旱事件(即正常或洪涝事件, $x_t \geq x'$)。本文以 -1 为阈值, 即当 scPDSI_{pm} 值低于 -1 时, 认为发生干旱。

干旱历时和干旱烈度是干旱事件的基本属性特征, 前者为旱情开始(即某场干旱事件中 scPDSI_{pm} 低于 -1 的第一个时刻)至结束时刻的时间长度, 后者为各干旱历时上 x_t 偏离 x' 所包围的面积。此外, 还可以利用统计方法提取其他衍生属性, 如干旱面积, 即发生干旱的气象站点数占总气象站点数的百分比, 可用于反映干旱的空间影响范围; 旱情最可能开始月份通过统计所有干旱事件开始时刻的季节分布得到, 对评估干旱对作物的影响有一定指示意义。

3 结果与分析

3.1 历史旱涝演变趋势

基于 M-K 趋势检验, 得到各气象站点 scPDSI_{pm} 年均值的历史旱涝趋势如图2所示。可以看出, scPDSI_{pm} 年趋势在东北、华北、华中以及西南地区呈显著的变旱条带, 约占中国国土面积的一半以上, 变湿区域则主要集中在西北以及华东地区。各月旱涝趋势的空间分布与年趋势大致相似。由图3可以看出, 差异较显著的主要在 6、7 和 12 月, 其变涝面积

有所增加,尤其是6月,全国大部分地区呈变涝趋势,4月和10月则表现为变旱面积略有增加。此外,中国东部地区旱涝趋势呈现明显的季节交替变化规律,冬季(12—2月)、夏季(6—8月)呈变涝趋势,春季(4—5月)和秋季(9—10月)则呈变旱趋势。

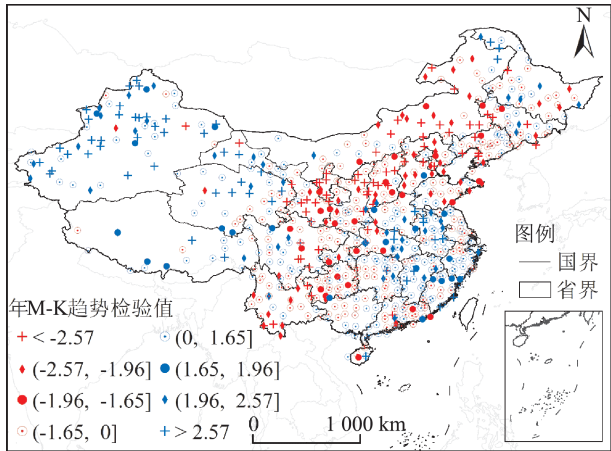


图2 年 M-K 趋势检验值

Fig.2 Annual M-K trend test results

3.2 干旱历时与干旱烈度

基于游程理论,图4给出了 $scPDSI_{pm}$ 识别的中旱等级以上(即 $scPDSI_{pm}$ 值小于或等于 -2) 干旱事件的平均历时和烈度。可以看出,平均干旱历时的变化范围为7~11周,空间上以秦岭-淮河为界,南

方地区干旱历时普遍短且烈度小,平均干旱历时超过11周(约3个月)的区域主要集中在黄河流域、新疆内陆河等地。干旱烈度与平均干旱历时的空间分布较为相似,平均干旱历时较长的地区相应干旱烈度也越大。这一空间分布特征与其他研究采用不同指数得到的结果基本一致^[21]。此外,由于构建的 $scPDSI_{pm}$ 是短时间尺度干旱指数,相比于长时间尺度指数, $scPDSI_{pm}$ 对旱涝状态的变化更为敏感,指数序列震荡较为频繁,因而识别的干旱历时较短。

图5为干旱事件最可能开始月份的空间分布。中国大部分地区旱情的起始时间集中在4—7月,其中中华中和华东地区旱情最可能发生时间主要在7月,青海以西地区干旱暴发时间大多在春季4—5月。对于西藏和新疆地区,旱情最可能发生时间主要在1—3月,浙江、福建以及两广的沿海地带则为秋旱多发地带,旱情出现时间通常在9—10月。结合我国主要粮食作物的产地和播种生长时间可以看出,就小麦而言,我国春小麦主要产地在东北平原,生长期为3月中下旬至7月中下旬,而该地区的干旱最可能开始时间为4—6月,会对作物的生长产生较大影响。水稻的主要产地集中在秦岭-淮河以南,作物的生长发育主要在3—10月,由于该地区干旱可能发生时间均处于作物的生长周期内,干旱对作物产量也有一定影响。

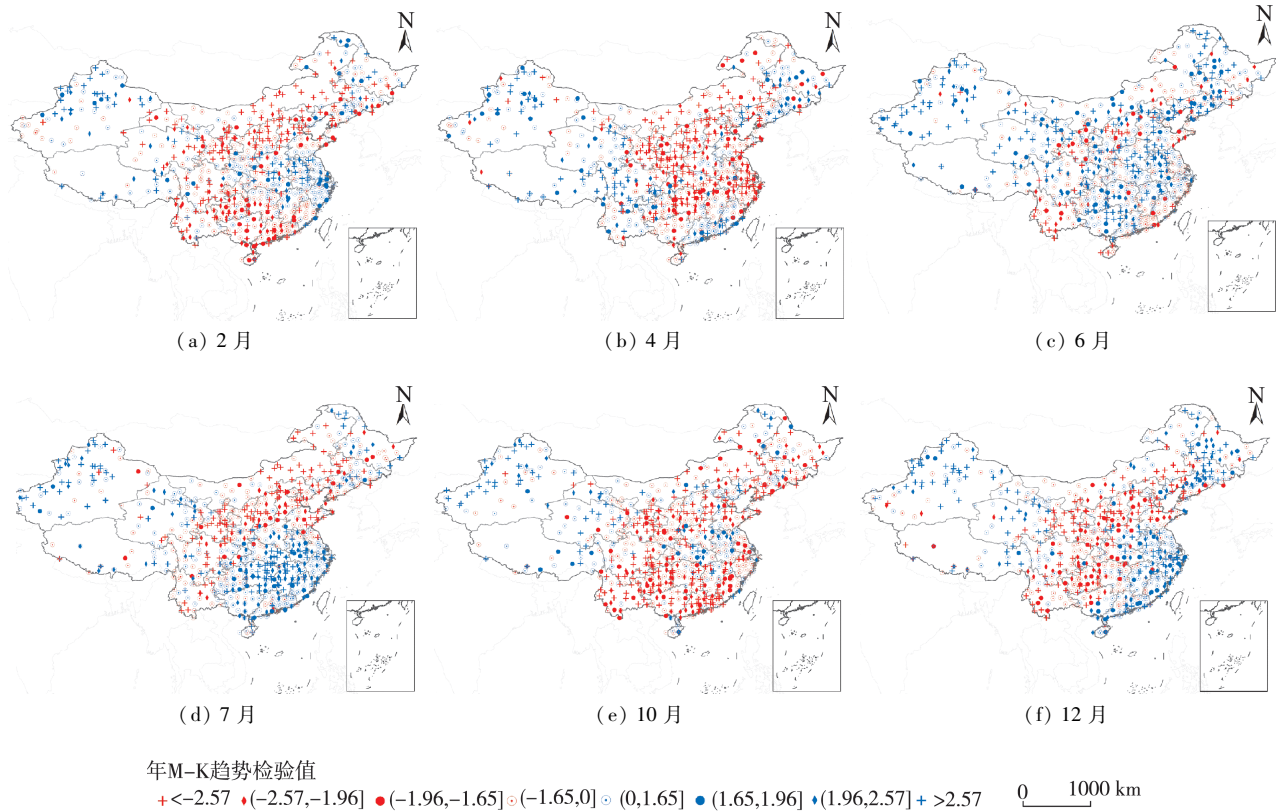
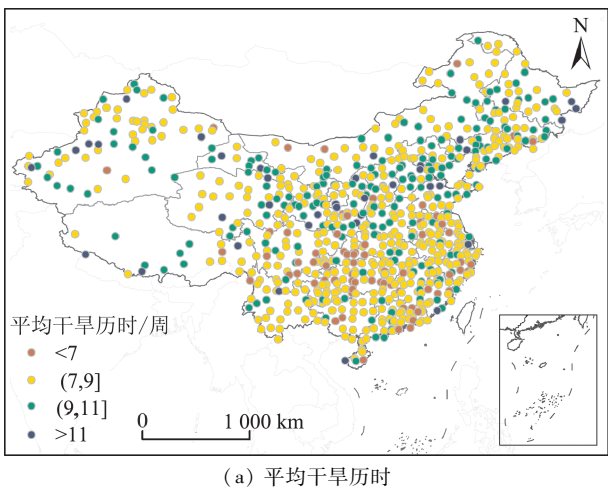
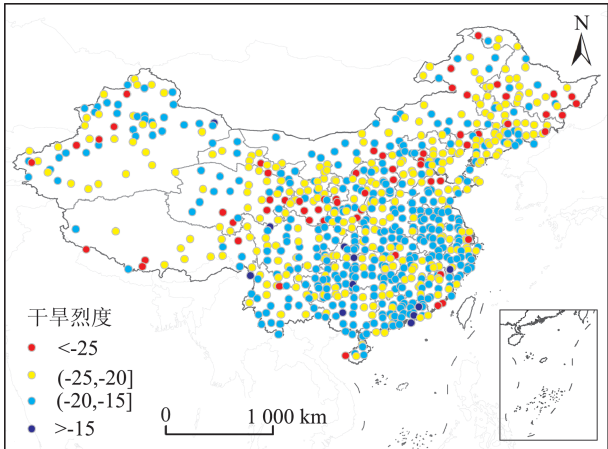


图3 不同月份 M-K 趋势检验值

Fig.3 Monthly M-K trend test results



(a) 平均干旱历时



(b) 干旱烈度

图4 平均干旱历时和干旱烈度空间分布

Fig.4 Spatial distribution of average drought duration and drought severity

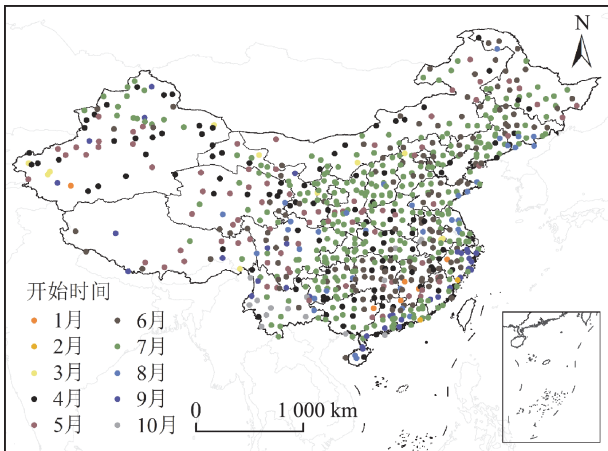


图5 干旱事件最可能开始月份空间分布

Fig.5 Spatial distribution of most possible initiation month of drought events

3.3 干旱事件时空演变过程监测

以2015年夏季干旱事件为例,分析 $scPDSI_{pm}$ 对旱情的监测能力。《中国水旱灾害公报2015》^[22] 实际旱情统计结果显示:与21世纪旱情受灾平均值相比,2015年全国旱情偏轻,作物因旱受灾面积

10067.05 hm^2 ;空间上,受灾区域主要集中在北方,严重受灾地区包括内蒙古、河北、辽宁、山东4省区;从季节上来看,河北、山东、山西、甘肃、陕西等省冬季和春季干旱程度较轻,内蒙古、河北、辽宁、山东、山西、吉林发生夏季干旱,华南和西南局部地区出现了阶段性春季干旱和夏季干旱。

图6和图7给出了由 $scPDSI_{pm}$ 计算得到的2015年全国中旱以上面积占比的时间序列以及旱情中心的时空演变过程。可以看出,在冬末春初、春末至夏季干旱面积的占比增大,尤其是夏季,全国中旱面积达到18%,重旱和极旱面积超过10%。空间上,春季初(3月19日至4月23日,图7(a)(b))华北地区呈现轻微干旱迹象,南方地区出现中旱;春末夏初(5月28日到7月9日,图7(c)(d))华北、黄淮海、东北等地旱情持续增强,随后在夏季(8月6日至8月27日,图7(e)(f))向内蒙古中西部和西南地区转移。

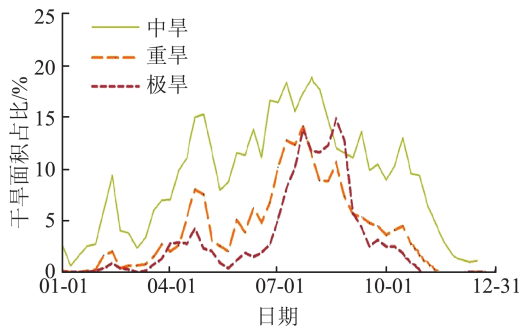


图6 2015年中旱面积占比变化

Fig.6 Changes in percentage of drought area in 2015

目前大部分干旱指数都能够有效监测长历时大规模干旱事件(如极旱年份的2006年、2009—2010年),然而在监测局部地区快速发展的旱情方面仍存在灵敏度低、响应延迟等问题。总体来看,本文构建的短时间尺度干旱指数 $scPDSI_{pm}$ 能够有效反映2015年干旱事件的季节变化规律,并准确捕捉旱情中心的空间转移过程,可用于监测农业干旱。

4 结论

a. M-K趋势检验分析结果表明,空间上中国东北、华北、华中、西南呈显著变旱趋势,西北和东南少数地区为变涝趋势。

b. 北方易发生历时长烈度大的干旱事件,南方干旱事件的历时短烈度小。全国大部分地区旱情开始时间集中在6—7月。

c. 通过与实际旱情记录比对发现, $scPDSI_{pm}$ 能够很好地捕捉2015年干旱的发生时间和集中区域,也能够较准确地捕捉旱情中心的转移过程。

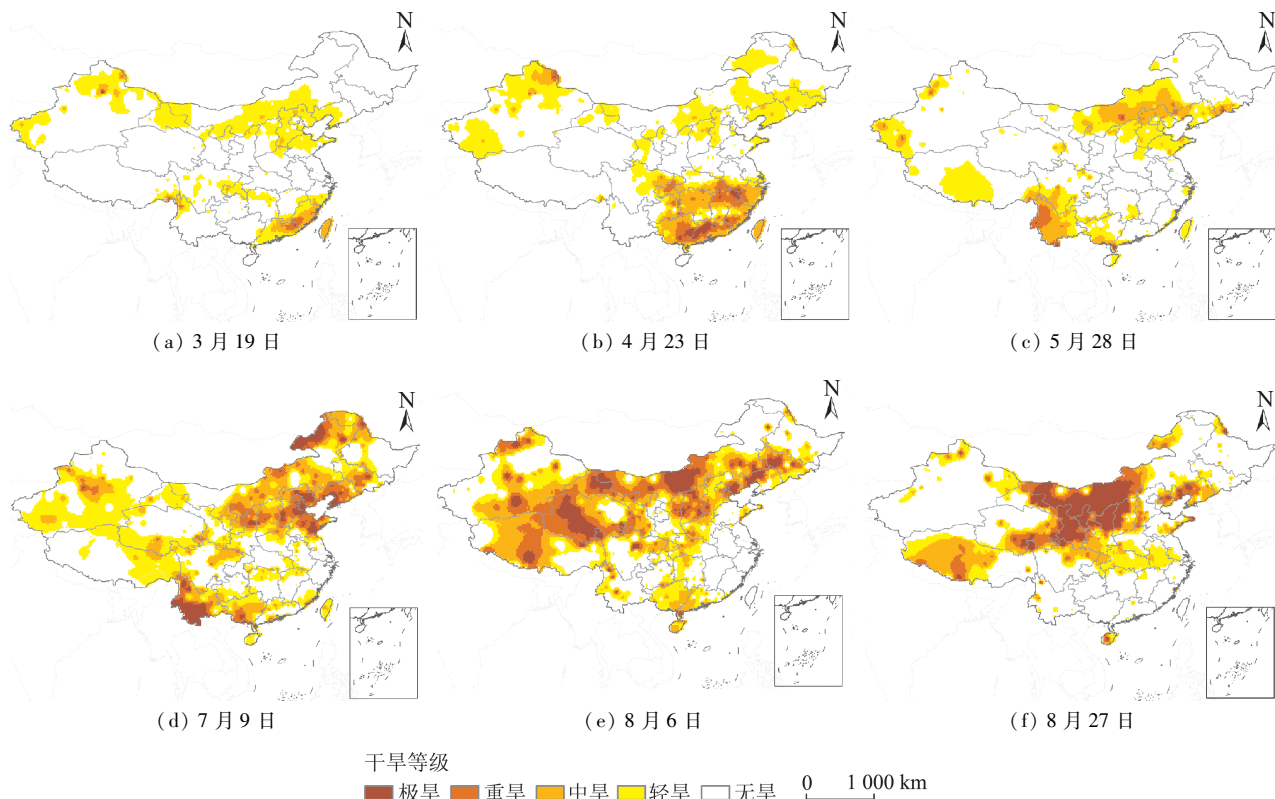


图 7 2015 年干旱事件时空演变过程

Fig. 7 Spatiotemporal evolution of drought events in 2015

参考文献:

- [1] 倪深海,顾颖,彭岳津,等. 近七十年中国干旱灾害时空格局及演变[J]. 自然灾害学报,2019,28(6):176-181. (NI Shenhai, GU Yin, PENG Yuejin, et al. Spatio-temporal pattern and evolution trend of drought disaster in China in recent seventy years [J]. Journal of Natural Disasters,2019,28(6):176-181. (in Chinese))
- [2] 张强,姚玉璧,李耀辉,等. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J]. 气象学报,2020,78(3):500-521. (ZHANG Qiang, YAO Yubi, LI Yaohui, et al. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China [J]. Acta Meteorologica Sinica,2020,78(3):500-521. (in Chinese))
- [3] 邓鹏,孙善磊,黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):39-45. (DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(1):39-45. (in Chinese))
- [4] 班璇,师崇文,郭辉,等. 气候变化和水利工程对丹江口大坝下游水文情势的影响[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):1-7. (BAN Xuan, SHI Chongwen, GUO Hui, et al. Effects of climate change and water conservancy projects on hydrological regime downstream of Danjiangkou Dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(4):1-7. (in Chinese))
- [5] 栗晓玲,梁箴. 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 Guanzhong area [J]. Water Resources Protection,2019,35(4):17-23. (in Chinese))
- [6] 吴志勇,程丹丹,何海,等. 综合干旱指数研究进展[J]. 水资源保护,2021,37(1):36-45. (WU Zhiyong, CHENG Dandan, HE Hai, et al. Research progress of composite drought index [J]. Water Resources Protection,2021,37(1):36-45. (in Chinese))
- [7] 栗晓玲,张更喜,冯凯. 干旱指数研究进展与展望[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(5):9-18. (SU Xiaoling, ZHANG Gengxi, FENG Kai. Progress and perspective of drought index [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2019,17(5):9-18. (in Chinese))
- [8] 陶然,张珂. 基于PDSI的1982—2015年我国气象干旱特征及时空变化分析[J]. 水资源保护,2020,36(5):50-56. (TAO Ran, ZHANG Ke. PDSI-based analysis of characteristics and spatiotemporal changes of meteorological drought in China from 1982 to 2015 [J]. Water Resources Protection,2020,36(5):50-56. (in Chinese))
- [9] PALME R W C. Meteorological drought [M]. Washington, D. C.: US Department of Commerce, Weather

- Bureau,1965.
- [10] DAI A. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. *Nature Climate Change*, 2013,3(2):52-58.
- [11] LIU Y, YANG X, REN L, et al. A new physically based self-calibrating Palmer drought severity index and its performance evaluation [J]. *Water Resources Management*, 2015,29(13):4833-4847.
- [12] ALLEY W M. The Palmer drought severity index: limitations and assumptions [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1984,23(23):1100-1109.
- [13] GUTTMAN N B. Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2010,34(1):113-121.
- [14] ZHU Y, LIU Y, MA X, et al. Drought analysis in the Yellow River Basin based on a short-scalar Palmer drought severity index[J]. *Water*, 2018,10(11):1526.
- [15] WELLS N, GODDARD S, HAYES M J. A self-calibrating Palmer drought severity index [J]. *Journal of Climate*, 2004,17(12):2335-2351.
- [16] VAN DER SCHRIER G, JONES P D, BRIFFA K R. The sensitivity of the PDSI to the Thornthwaite and Penman-Monteith parameterizations for potential evapotranspiration [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011,116: D03106.
- [17] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements: irrigation and drainage paper 56 [R]. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [18] LIU Y, ZHU Y, REN L, et al. A multiscalar Palmer drought severity index[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017,44(13):6850-6858.
- [19] MANN H B. Nonparametric test against trend [J]. *Econometrica*, 1945,13(3):245-259.
- [20] KENDALL M G. Rank correlation methods [J]. *British Journal of Psychology*, 1990,25(1):86-91.
- [21] WANG W, ZHU Y, XU R, et al. Drought severity change in China during 1961-2012 indicated by SPI and SPEI [J]. *Natural Hazards*, 2015,75(3):2437-2451.
- [22] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报 2015[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016: 56-78.

(收稿日期:2021-01-08 编辑:熊水斌)

(上接第 123 页)

- [20] 任国玉,王涛,郭军,等. 海河流域近现代降水量变化若干特征[J]. *水利水电科技进展*, 2015,35(5):103-111. (REN Guoyu, WANG Tao, GUO Jun, et al. Characteristics of precipitation variations in Haihe River Basin in modern times[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015,35(5):103-111. (in Chinese))
- [21] 浙江省水文勘测局. 浙江省短历时暴雨[R]. 杭州: 浙江省水文勘测局, 2003.
- [22] 郭金燕. 北京市 24h、3d 暴雨定点定面关系分析[J]. *北京水利*, 2001(4):22-24. (GUO Jinyan. Analysis of relations between fixed point and fixed area for 24h and 3d storm in Beijing[J]. *Beijing Water Resources*, 2001(4):22-24. (in Chinese))
- [23] 宋承新. 山东省定点定面雨量关系浅析[J]. *水文*, 1997(2):26-29. (SONG Chengxin. Analysis of relations between fixed point and fixed area for storm in Shandong Province[J]. *Journal of China Hydrology*, 1997(2):26-29. (in Chinese))
- [24] 金新芽,邵学强,马志鑫,等. 浙江省暴雨定点定面关系分析[J]. *浙江水利科技*, 2003(2):7-8. (JIN Xinya, SHAO Xueqiang, MA Zhixin, et al. Analysis of relations between fixed point and fixed area for storm in Zhejiang Province[J]. *Zhejiang Hydrotechnics*, 2003(2):7-8. (in Chinese))
- [25] 霍勇峰,吴大光. 山西省暴雨定点定面关系分析[J]. *东北水利水电*, 2011,29(12):48-49. (HUO Yongfeng, WU Daguang. Analysis of relations between fixed point and fixed area for storm in Shanxi Province[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2011,29(12):48-49. (in Chinese))
- [26] 杜长辉. 宿州、淮北两市暴雨定点定面关系分析[J]. *安徽农学通报*, 2009,15(15):159-160. (DU Changhui. Analysis of relations between fixed point and fixed area for storm in Suzhou and Huaibei[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2009,15(15):159-160. (in Chinese))
- [27] 殷伟量,彭博,万昔超,等. 黄山市 24h、3d 暴雨点面关系分析[J]. *江淮水利科技*, 2017(1):38-40. (YIN Weiliang, PENG Bo, WAN Xichao, et al. Analysis of relations between point and surface of 24h and 3d rainstorm in Huangshan City[J]. *Jianghuai Water Resources Technology*, 2017(1):38-40. (in Chinese))
- [28] 王云辉,曾国熙,张正康. 浙江省水文特性分析[J]. *水文*, 2009,29(4):79-82. (WANG Yunhui, ZENG Guoxi, ZHANG Zhengkang. Analysis of Zhejiang hydrological characteristics[J]. *Journal of China Hydrology*, 2009,29(4):79-82. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-03-23 编辑:施业)