

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2021.0012

卓志宇, 龙秋波, 白鹏. 适宜表征农业干旱的气象干旱指标[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(1): 119-128.
ZHUO Z Y, LONG Q B, BAI P. Scale of meteorological drought index suitable for characterizing agricultural drought: A case study of Hunan Province[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 119-128. (in Chinese)

适宜表征农业干旱的气象干旱指标

——以湖南省为例

卓志宇¹, 龙秋波¹, 白鹏²

(1. 湖南省水利水电勘测设计研究总院, 长沙 410007;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 以最新的全国土壤水再分析产品为参考, 通过最大相关性分析确定最适宜表征湖南省农业干旱的标准化降水蒸散发指数(SPEI)时间尺度, 进而分析湖南省1960—2014年农业干旱的时空演变特征。结果表明: 全省尺度最适宜表征农业干旱的SPEI时间尺度为SPEI 6; 基于SPEI 6表征的全省农业干旱在1960—2014年呈不显著减小趋势, 中度及以上干旱的发生频率为14.4%, 重度及以上干旱的发生频率为4.9%; 在季节分布上, 中度及以上农业干旱在冬季发生频率最高, 其次为秋季; 重度及以上农业干旱亦在冬季发生频率最高, 其次为春季; 在年代际变化上, 农业干旱的发生频率在20世纪60年代最高, 而后持续降低, 90年代达到最低值, 21世纪初又快速升高。

关键词: 气象干旱; 农业干旱; 湖南省; 干旱评估; 气候变化

中图分类号: TV 213 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



农业干旱是指植被生育期内土壤水分收支不平衡形成的水分短缺现象^[1]。农业干旱影响农作物生长发育, 进而导致农作物减产, 是全球最为常见的自然灾害之一。在升温背景下, 全球农业干旱的频率和强度呈增加的趋势^[2-3]。仅中国范围内, 2014年干旱受灾面积为1 227.2万hm², 75.2万hm²农田绝收, 旱灾造成的直接经济损失高达910亿元^[4]。在农业干旱监测中, 土壤水扮演着十分重要的角色。当植被根区土壤水低于某个阈值时, 根系吸水会受到胁迫, 植被不再处于最佳的生长状态; 当水分胁迫严重时, 可能会造成植被死亡^[1]。从土壤可利用水的角度, 基于土壤含水量和特性参数构建的干旱指数最适合表征农业干旱^[5]。然而, 由于气候、土壤和地形特征的空间异质性, 大范围的土壤水监测需要

布置大量的探头, 监测费时、费力, 花费高。因此, 基于实测土壤含水量的干旱指标在大范围的农业干旱监测中受到限制。许多学者^[6-8]尝试从其他途径来间接地反映农业干旱状况, 常见的替代途径包括卫星遥感反演、陆面/水文模型模拟以及用气象干旱表征农业干旱。卫星遥感反演仅能获取表层(0~5 cm)土壤的干湿状态, 且反演精度受限于土壤类型、地表覆盖和大气条件等诸多因素影响^[9]。陆面模式同化技术能够将陆面模式的物理过程信息和多源观测资料进行最优结合, 且能够模拟整个根区的土壤水状态, 在土壤水监测方面具有很大的应用前景^[10-11]。但是, 陆面同化土壤水产品往往存在时间序列短、空间分辨率低以及数据更新不及时等问题。从陆气互馈角度, 气象干旱与农业干旱之间关系密

收稿日期: 2020-05-13 修回日期: 2020-07-02 网络出版时间: 2020-07-21

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200721.1236.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51979263); 湖南省重大水利科技专项(湘水科技(2015)186-12)

作者简介: 卓志宇(1982—), 男, 湖南慈利人, 高级工程师, 主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: 37384065@qq.com

通信作者: 白鹏(1983—), 男, 河北石家庄人, 副研究员, 博士, 主要从事水文学水资源研究。E-mail: baip@igsnr.ac.cn

切。气象干旱是农业干旱的诱因,且发生时间早于农业干旱。基于此,许多学者^[12-15]尝试通过气象干旱指标来表征农业干旱。常用的气象干旱指标包括标准降水指数 SPI (standard precipitation index^[16])、palmer 干旱指数 PDSI (palmer drought severity index^[17]) 以及 SPEI (standard precipitation evapotranspiration index)^[18]。SPI 是单纯依赖于降水量的干旱指数,根据降水的累积频率分布来划分干旱等级,适用于月尺度以上的干旱监测与评估^[7]。PDSI 是基于水量平衡原理建立的综合气象干旱指标,它综合考虑了前期降水、蒸散发、径流和土壤水等要素对干旱的影响,具有明确的物理基础,且能够从机理上反映土壤水亏缺的成因。但是,PDSI 在描述干旱的持续时间方面存在一定的不足^[8]。SPEI 耦合了 PDSI 和 SPI 的优点,弥补了 PDSI 在描述干旱持续时间方面的不足,能够更好地反映持续时间长的连续干旱事件^[8]。另外,SPEI 考虑了温度对干旱的影响,引入了地表潜在蒸散发来描述干旱的强度和持续时间,适用于气候变暖背景下多尺度的农业干旱监测和评估^[19]。以往一些研究^[20-22]表明,SPEI 较其他气象干旱指标更适合于农业干旱的评估。例如:蔡思扬等^[20]基于东北地区农业旱灾减产数据比较了 SPI 和 SPEI 在农业旱灾评估方面的能力,结果表明 SPEI 对东北地区农业旱灾评估能力优于 SPI;容锦盟等^[21]以农业灾害调查统计数据为参考,比较了 4 种气象干旱指数在华北地区农业干旱评估中的适用性,结果表明,SPEI 表征的干旱发生状况与旱灾统计结果最为吻合;Tian 等^[22]基于土壤水和作物产量数据评估了 6 种气象干旱指标在美国中部农业干旱监测中的适用性,结果表明,SPEI 与土壤水观测的相关性最强。

干旱具有多尺度特征,受灾体对不同时间尺度的干旱的响应存在差异^[1]。SPEI 可以从多个时间维度反映干旱的时空演变特征^[5]。通常认为,短期(1~6 个月)的 SPEI 适合反映土壤水的波动,长期(6 个月以上)的 SPEI 值与地下水、河川径流等具有较好的相关性^[19]。但有研究^[22-23]表明,最适宜表征农业干旱的 SPEI 时间尺度具有很强的区域分异规律,从 3 个月到 12 月变化不等。当前,未有研究报道适合于湖南省农业干旱监测的 SPEI 时间尺度。本文以湖南省为研究区,基于最新的格点再分析土壤水分产品为参考,分析不同时间尺度 SPEI 与 1 m 土层内土壤水之间的相关性,确定最适宜表征农业干旱特征的 SPEI 时间尺度,进而分析湖南省 1960—2014 年农业干旱的时空演变特征,研究成果有助于

深入认识气象干旱指数与农业干旱灾情的联系,对于湖南省农业干旱的监测和预报有一定的应用价值。

1 资料和方法

1.1 研究区概况

湖南省地处云贵高原向江南丘陵和南岭山脉向江汉平原过渡的地带(图 1(a)),地势三面环山,北部为地势较低的洞庭湖平原,东西宽 667 km,南北长 774 km,地跨长江、珠江两大水系,主要水系包括湘江、资江、沅江、澧水等。湖南省属大陆性亚热带季风湿润气候,春夏多雨,秋冬干旱,多年平均降水量为 1450 mm,多年平均气温一般为 16~19 ℃。湖南省地貌以山地为主,占全省总面积的 51.1%,丘陵占 15%,平原面积仅占 13%。湖南省是农业人口大省,2016 年末全省农业人口为 3223 万人,占全省总人口的比例为 47.4%,耕地面积占全省总面积的 28.7%(2015 年,图 1(b))。湖南省降雨充沛,各地防旱抗旱的意识普遍不强,旱灾一旦发生会造成巨大的社会经济影响。历史上,湖南省旱灾频发。据报道,1951—2000 年全省每年干旱受灾面积和成灾面积占耕地总面积的 12.5% 和 6.7%^[7]。

1.2 数据来源与处理

本文用到的数据包括气象数据、土壤水分再分析产品、地形和土地利用数据。气象数据来源于国家气象中心(<http://data.cma.cn/>),包括湖南省及其周边 38 个监测站点 1960—2014 年的降水、气温、风速、湿度和日照时数等数据(图 1(a))。采用专业的气象插值软件 Anusplin 将站点气象数据插值成 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 栅格数据。该软件最大的特点是考虑了地形变化对气象要素插值的影响,对于一些受地形影响较大的气象变量(如气温、风速等)有较好的插值效果^[24]。土壤水再分析数据来源于清华大学阳坤团队发布的基于微波数据同化的中国土壤水分数据集产品(简称 LDAS-SM)(<http://data.tpdc.ac.cn/zlhans/dat/a/add77205-ad37-4b93-bfe8-25618529229a>)。该产品基于可优化模型参数的双通道数据同化系统,同时考虑了陆面模型模拟和微波卫星观测的约束,通过同化被动微波卫星 AMSR-E 亮温生成了中国格点尺度土壤水分数据集^[11]。基于实测数据的评估结果表明,该产品相比于卫星反演产品和陆面过程模拟具有更高的精度和可靠性。LDAS-SM 产品的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为天,时间跨度从 2002 年 6 月至 2011 年 11 月,它提供了 0~100 cm 土层内的 3 层(0~5、5~20 和 20~

100 cm) 土壤体积含水量。地形数据来源于美国地调局的 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 产

品; 土地利用数据获取自中国资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=99>)。

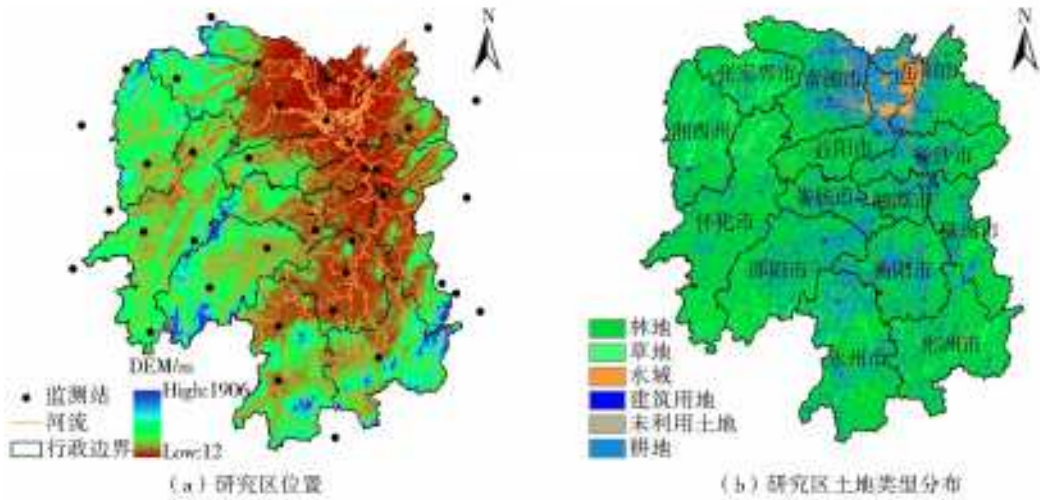


图1 研究区位置(a)及土地类型分布(b)

Fig. 1 Research area (a) and land type distribution (b)

1.3 标准化降水蒸散发指数 SPEI

SPEI 是 Vicente Serrano 等在 SPI 指数基础上引入了潜在蒸散发构建的气象干旱指标^[18]。该指标采用月降水与潜在蒸散之差表征大气水分亏缺, 改进了 SPI 单纯依赖降水描述干旱的缺陷^[22]。此外, 同 SPI 一样, SPEI 可以反映大气水分亏缺在多个时间维度下累积状态。例如, 6 个月尺度的 SPEI (SPEI-6) 量化了连续 6 个月的大气水分亏缺累积到当前月份的状态。SPEI 的值越小表示干旱的程度越严重。SPEI 的具体计算步骤如下。

第一步, 利用逐月的降水 (P_r) 和潜在蒸散发 (PET) 计算逐月的大气水分盈缺量 (D), 然后构建不同时间尺度下大气水分盈缺量的累积序列

$$\begin{cases} D_i = P_{r_i} - PET_i \\ D_i^k = \sum_{i=k+1}^n D_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: k 表示时间尺度, 月; n 为数据序列的样本数。

第二步, 采用三参数的 Log-Logistic 概率分布函数对 D 序列数据进行参数拟合

$$f(x) = \beta/\alpha \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2} \quad (2)$$

参数 α, β, γ 的计算公式为

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - 6\omega_2}, \quad \alpha = \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)}, \\ \gamma &= \omega_0 - \alpha\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta) \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\omega_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{i-0.25}{N}\right)^s D_i, \quad s = 0, 1, 2 \quad (4)$$

第三步, 计算 D_i 的累计概率密度函数

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^{\beta}\right]^{-1} \quad (5)$$

第四步, 对累计概率密度进行正态标准化, 计算

SPEI。

当累计概率密度 $P \leq 0.5$ 时

$$w = \sqrt{-2\ln(P)},$$

$$SPEI = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (6)$$

当 $P > 0.5$ 时

$$w = \sqrt{-2\ln(1-P)},$$

$$SPEI = \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} - w \quad (7)$$

式中: $c_0 = 2.515517$; $c_1 = 0.802853$; $c_2 = 0.010328$; $d_1 = 1.432788$; $d_2 = 0.189269$; $d_3 = 0.001308$ 。本文参考常见的 SPEI 干旱等级划分标准, 按照 $-1.0 < SPEI \leq -0.5$, $-1.5 < SPEI \leq -1.0$, $-2.0 < SPEI \leq -1.5$ 和 $SPEI \leq -2.0$ 的标准, 把干旱分为轻旱、中旱、重旱和极端干旱等 4 个不同的等级^[6]。SPEI 详细的计算步骤可参见 McKee 等^[6] 和 Vicente Serrano 等^[18], 计算程序可通过以下网站获取: <https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/>。另外, 有研究^[25]表明, 不同的潜在蒸散发计算方法对 SPEI 的结果有显著的影响。相比于基于温度的潜在蒸散发方法 (如 Thornthwaite 方法), 物理基础的 Penmar Monteith 方法估算的 SPEI 指数能够更好地反映农业干旱发生的强度和范围^[26]。因此, 本文基于联合国粮农组织推荐的 Penmar Monteith^[27] 来计算潜在蒸散发。此外, 本文还比较了 SPEI 指数和 PDSI 指数在湖南省农业干旱评估中的适宜性。PDSI 详细的计算步骤请参考 Jacobi 等^[28]。

1.4 相关分析、趋势和频率分析

本研究基于微波数据同化的中国土壤水分数

据集产品(LDAS-SM)为参考,通过最大相关分析来确定适宜表征农业干旱的 SPEI 时间尺度。具体步骤如下:(1)在栅格尺度(0.25°×0.25°)基于逐月的降水和潜在蒸散发计算 1~12 个月尺度的 SPEI 值(本文中,SPEI- 后面的数字代表 SPEI 的时间尺度)。(2)基于加权平均得到 0~100 cm 土层内 LDAS-SM 的逐日土壤含水量,逐栅格提取 LDAS-SM 土壤水日序列,并将日序列累加成月序列,再采用 Z-score 方法将月序列标准化。(3)逐栅格统计标准化的 LDAS-SM 序列与不同尺度下 SPEI 序列的相关性,记录最大相关系数及其对应的时间尺度。步骤 3 中,Z-score 标准化用到的公式为

$$x^* = (x - \bar{x}) / \sigma \quad (8)$$

式中: x 和 x^* 表示标准化前、后数据序列值; \bar{x} 是原始数据序列均值; σ 是原始数据序列标准差。

基于世界气象组织推荐并广泛应用的 Mann-Kendall^[29] 非参数统计方法检验 SPEI 序列趋势的显著性。假设数据序列($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$)是 n 个独立且随机分布的样本,定义检验统计量

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j), i, j \leq n, i \neq j \quad (9)$$

式中:当 $x_i - x_j$ 小于、等于和大于 0 时, $\text{sign}(x_i - x_j)$ 分别为 -1, 0 和 1;不同状态的统计量 S 值对应的 Z 值分别为

$$\begin{cases} Z = (S - 1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S > 0 \\ Z = 0 & S = 0 \\ Z = (S + 1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S < 0 \end{cases} \quad (10)$$

当 Z 值大于 0 时表示增加趋势,负值表示减少趋势。当 Z 的绝对值大于 1.64 时表示通过了 95% 的置信度检验。干旱频率用来量化统计时段内干旱发生的频繁程度,计算方法为

$$f = n/N \times 100\% \quad (11)$$

式中: f 为干旱频率,%; n 为发生干旱的月数; N 为总月数。

2 结果与分析

2.1 适宜表征农业干旱的 SPEI 尺度分析

栅格尺度上,统计了参考土壤水与 1~12 月尺度 SPEI 序列的最大相关性(图 2)。结果表明,二者之间最大的相关系数(R_{\max})在空间上的变化范围为 0.35~0.73(图 2(a))。 R_{\max} 较高的地区集中在湖南省的中、北部,如岳阳、怀化和邵阳部分地区; R_{\max} 较低的地区多分布在南部,如株洲、郴州和永州。 R_{\max} 对应的 SPEI 时间尺度集中在 5~7 个月(图 2(b)),其中, SPEI6 所在栅格占全省栅格总数的比例最大(51.3%),其次为 SPEI5 (17.1%)和 SPEI7(12.1%)。空间上, SPEI6 在中南部多数地区能够最好的表征农业干旱,而北部的张家界、常德和湘西州部分地区最适宜表征农业干旱的是 SPEI4 或 SPEI5。就全省而言, SPEI6 最适宜表征湖南省农业干旱状况,因其格点数占全部格点的比例最高(51.3%)。此外, SPEI6 与参考土壤水有很好的相关性,二者的相关系数为 0.60(图 3)。

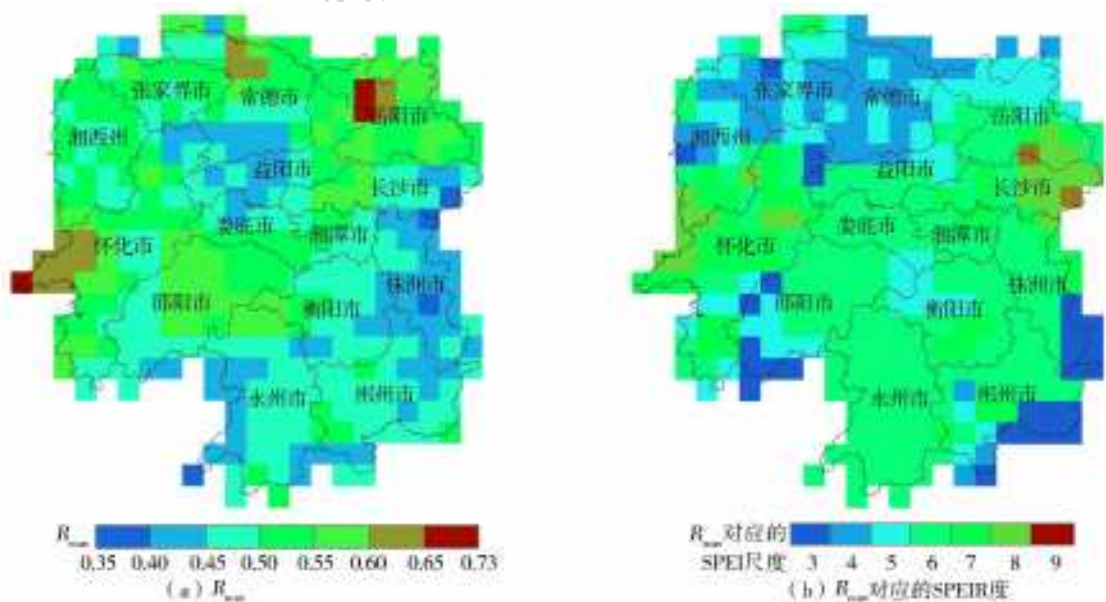


图 2 SPEI 与参考土壤水之间最大的相关系数(a)及其对应的 SPEI 时间尺度(b)

Fig. 2 The maximum correlation coefficient between the SPEI and referenced soil moisture time series (a); the time scale of SPEI corresponding to the maximum correlation coefficient at the grid scale (b)

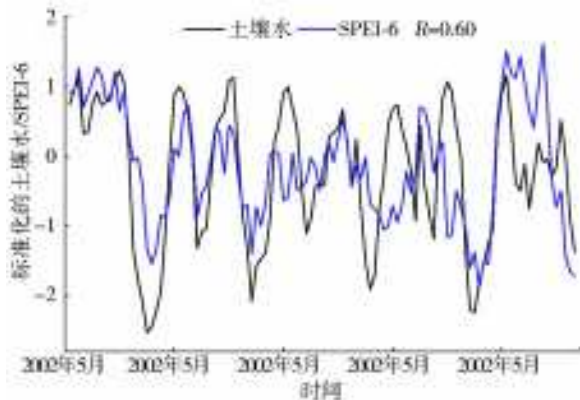


图3 全省尺度 SPEI6 与参考土壤水(LDAS SM)的相关性

Fig. 3 The correlation between the SPEI6 and referenced soil moisture (LDAS SM) in the whole province

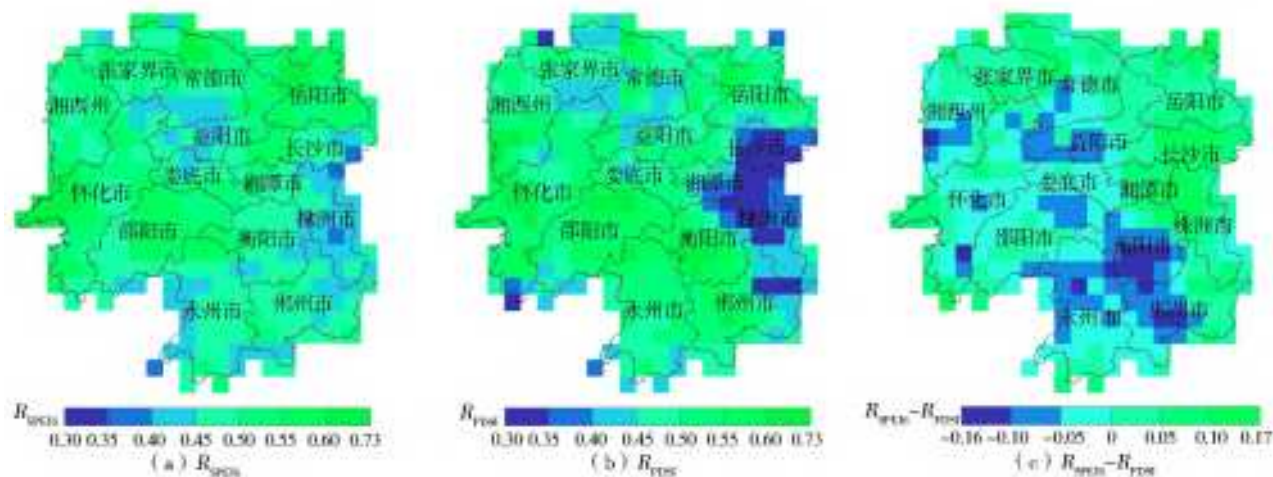


图4 2个气象干旱指数(SPEI6 和 PD SI)与参考土壤水的相关系数(R_{SPEI6} , $R_{PD SI}$)的空间分布以及二者之差($R_{SPEI6} - R_{PD SI}$)

Fig. 4 Spatial patterns of the correlation coefficient between the two meteorological indices (SPEI6 and PD SI) and referenced soil moisture (R_{SPEI6} , $R_{PD SI}$) and their differences ($R_{SPEI6} - R_{PD SI}$)

2.3 农业干旱的时空演变特征

基于 SPEI-6 指标, 分析全省 1960—2014 年农业干旱的时空演变特征(图 5)。全省而言, 1960—2014 年最严重(干旱强度)的干旱事件发生在 1998 年 12 月至 1999 年 5 月, 其中 1999 年 2、3 月的干旱强度为重度($SPEI < -1.5$)(图 5(a))。持续时间最长的干旱发生在 1962 年末至 1963 年末, 干旱持续时间 12 个月, 其中连续 10 个月为中度及以上干旱($SPEI < -1.0$)。其他一些典型的干旱事件如 1964 年 11 月至 1965 年 9 月的干旱, 持续时间 11 个月; 2009 年 5 月至 2010 年 5 月的干旱事件, 持续时间 11 个月, 中旱以上($SPEI < -1.0$)的月份有 7 个月。1960—2014 年, 全省农业干旱总体呈不显著($p > 0.05$)减小趋势(图 5(c))。其中, “变干”(SPEI6 趋势小于 0)的区域主要集中在湘西和张家界部分地区, 其他多数地区以“变湿”(SPEI6 趋势大于 0)趋势为主(图 5(b))。

2.2 SPEI6 指数与 PD SI 指数的比较

引入另一个气象干旱指标(PD SI)来进一步验证 SPEI6 在表征湖南省农业干旱方面的适宜性。图 4 展示了 2 种气象干旱指标(SPEI6 和 PD SI)与参考土壤水相关系数(R_{SPEI6} , $R_{PD SI}$)的空间分布及其差异。在空间分布上, R_{SPEI6} 和 $R_{PD SI}$ 基本保持一致, 但二者的相对大小存在差异。 R_{SPEI6} 大于 $R_{PD SI}$ 的地区主要集中在长沙、株洲和湘潭一带; R_{SPEI6} 小于 $R_{PD SI}$ 的地区主要集中在南部衡阳、永州和郴州一带(图 4(c))。在全省范围内, R_{SPEI6} 和 $R_{PD SI}$ 的平均值分别为 0.54 和 0.50, 且在全省 56% 的栅格上, R_{SPEI6} 大于 $R_{PD SI}$ 。因此, SPEI6 总体上较 PD SI 更适合用来表征湖南省的农业干旱发生状况。

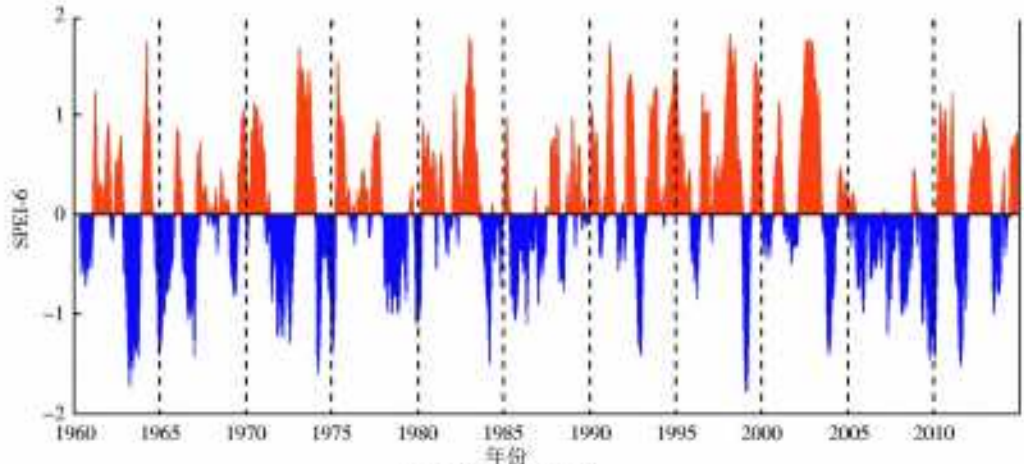
2.4 农业干旱频率分析

基于 SPEI6 表征的中度及以上($SPEI < -1.0$)和重度及以上($SPEI < -1.5$)农业干旱的频率空间分布见图 6。全省范围内, 中度及以上农业干旱发生频率为 11.8%~18.1%, 平均值为 14.4%。中度及以上干旱发生频率较高的地区包括湘西州、怀化市和永州市; 频率相对较低的地区为株洲和长沙地区。全省范围内, 重度及以上干旱发生频率为 3.3%~6.7%, 平均值为 4.9%。重度及以上干旱发生频率较高的地区为怀化、湘西、永州和邵阳市, 频率较低的地区为常德和张家界。

从中度及以上干旱发生的季节性分布(图 7(a)~(d))来看, 冬季发生干旱的频率最高, 平均值为 17.1%, 其次为秋季(15.7%)、夏季(14.1%), 春季发生频率最低(13.4%)。空间上, 中度及以上干旱频率较高的地区在春季为永州和湘西州部分地区, 在夏季为湘西州, 在秋季为北部几个地区(岳阳、怀化、常德、张家界和湘西州), 在冬季为常德、怀化和永州。重度及以上

干旱亦在冬季发生频率最高(图 7(h)), 平均值为 6.5%, 其次为春季(5.5%) (图 7(e)), 秋季和夏季平均值相当(图 7(f)、(g)), 分别为 4.3%、4.1%。空间

上, 重度及以上干旱发生频率较高的地区在春季为湘西州、郴州和永州部分地区, 在夏季为怀化市, 在秋季为永州市部分地区, 在冬季为邵阳、怀化和湘西州。



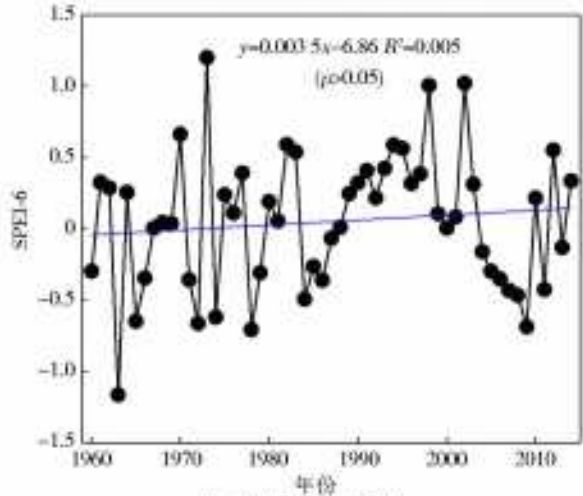
(a) SPEI-6月值变化



SPEI-6变化趋势

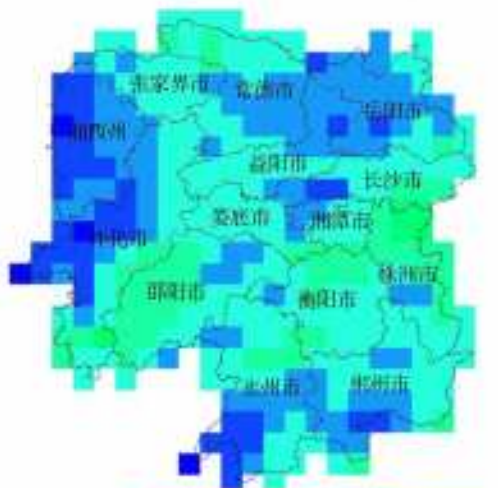
(10⁻⁷/(10a)) -7 -3 0 2 4 6 10

(b) SPEI-6变化趋势



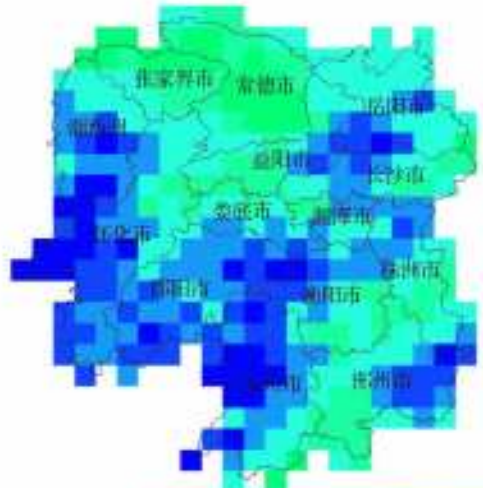
(c) SPEI-6年值变化

图 5 1960—2014 年湖南省 SPEI 6 月值(a) 和年值(c) 变化以及趋势的空间分布(b)
Fig. 5 Temporal changes in monthly (a) and annual (b) SPEI time series and the spatial distribution of the trend in annual SPEI 6 time series across Hunan Province (c)



中旱以上频率/
% 11.8 13.0 14.0 15.0 16.0 17.0 18.1

(a) 中旱以上频率



重旱以上频率/
% 3.3 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.7

(b) 重旱以上频率

图 6 湖南省中度及其以上农业干旱(a) 和重度及其以上农业干旱(b) 频率的空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of the sum of frequencies from moderate to extreme droughts (a) and from severe to extreme droughts (b) across Hunan Province

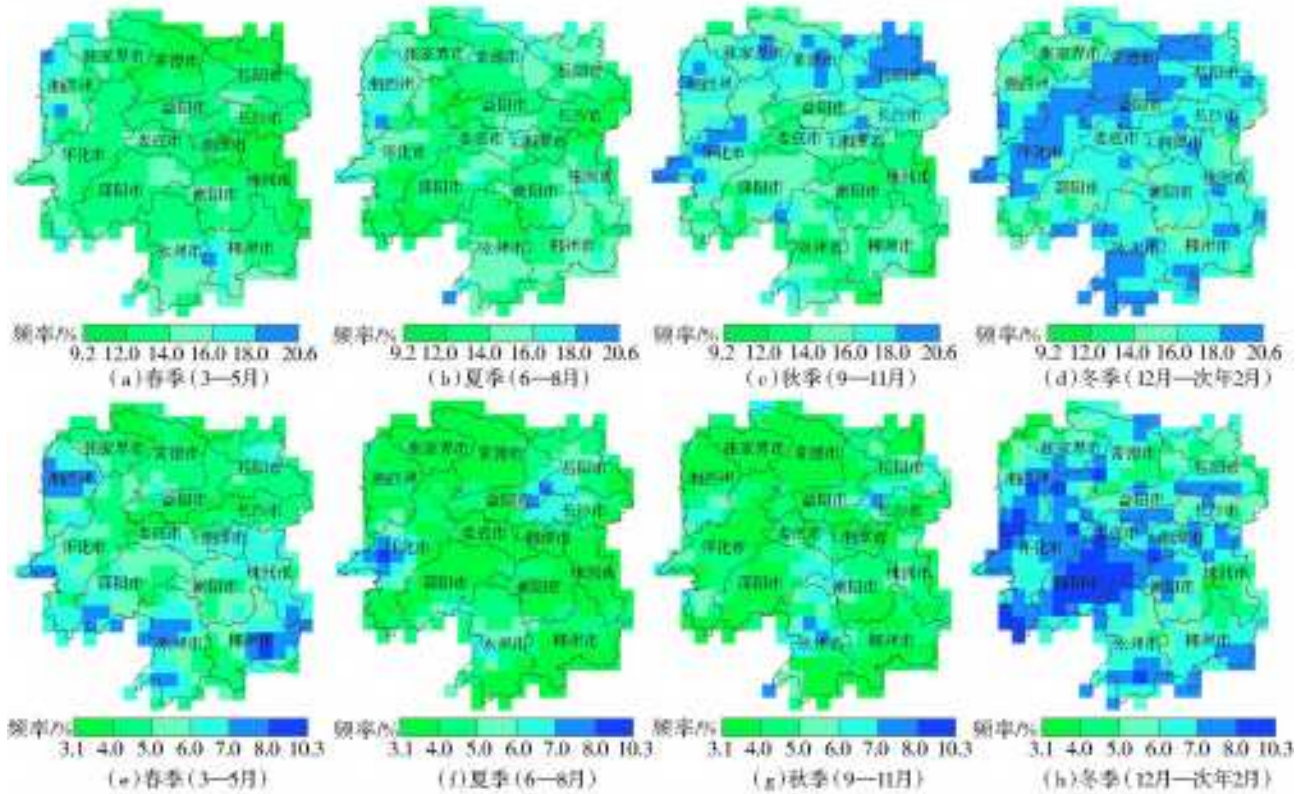


图7 湖南省中度及其以上农业干旱((a)~(d))和重度及其以上农业干旱((e)~(h))的季节性发生频率分布

Fig. 7 Spatial distribution of the seasonal frequency of moderate to extreme droughts (a-d) and from severe to extreme droughts (e-h) across Hunan Province

从全省干旱频率的年代际变化(表2)来看,干旱频率在20世纪60年代最高,而后逐渐降低,到90年代达到最低值,在21世纪初又快速升高。干旱频率在年代际上总体呈先减少后增加的趋势。

表2 湖南省农业干旱发生频率的年代际变化

Tab. 2 Interdecadal changes in the frequency of agricultural drought at Hunan Province scale

干旱频率	1961—1970年	1971—1980年	1981—1990年	1991—2000年	2001—2010年
轻旱频率/%	32.6	30.8	19.2	10.0	31.7
中旱频率/%	11.4	10.8	5.8	2.5	10.0

注:“轻旱频率”表示轻度及以上干旱(SPEI $6 < -0.5$)发生的频率;“中旱频率”表示中度及以上干旱(SPEI $6 < -0.5$)发生的频率;重度和极端干旱在全省尺度发生频率极低,因此未作统计。

2.5 讨论

本文以最新的全国土壤水再分析产品(LADSM)为参考,在栅格尺度确定了适宜表征湖南省农业干旱的SPEI时间尺度。但是,由于驱动数据、参数化方案和同化技术等的不确定性,参考土壤水产品仍不可避免地存在误差,且在湖南省的可靠性有待验证。此外,该产品只提供了1 m土层的土壤含水量,该深度能够满足多数农作物根部水分和养分吸收的需求,但仍有一些农作物的根系深度大于1 m。此外,根据《中国气象灾害大典——湖南卷》以及湖南省统计年鉴^[30-31]数据,1951—2010年,湖南省出现的特大旱灾年为1956、1960、1963、1971、1985、2007和2009年。但由于数据资料限制(本文数据开始于1960),除前两次特大干旱外,SPEI6均

能够反映历次特大干旱的发生时间(图5)。但是,SPEI6表征的干旱强度与旱灾调查数据在个别年份有所差别。例如:SPEI6表征的最强农业干旱年份(1999年)在历史旱灾调查数据中并不属于特大旱年份;一些强度不大的气象干旱(如1985年)在历史旱灾调查中却属于特大旱年份。SPEI6表征的农业干旱与历史旱灾调查结果不吻合的原因有很多。其中,干旱评估方法的差异是潜在原因之一。与SPEI的干旱等级划分不同(见1.3),旱灾调查通常基于全省农作物受旱面积或成灾面积百分比来定义旱情等级。气象干旱通常只发生在省内某个区域。因此,基于SPEI6的全省平均值来反映干旱的等级忽略了土壤含水量的空间差异性,容易引起农业干旱的程度被低估。此外,气象干旱传递到农业

干旱需要一定的持续时间。例如, 1999 年气象干旱尽管强度大, 但持续时间短(5 个月), 因此, 在旱灾调查中该年份并不属于特大干旱年。1985 年气象干旱强度不大, 但持续时间较长(11 个月), 因此在旱灾调查中属于特大干旱年。这说明农业旱灾评估要重视干旱长期的“累积效应”。

3 结 论

本文以最新的全国土壤水再分析产品为参考, 通过最大相关分析确定了最适宜表征湖南省农业干旱的 SPEI 时间尺度, 分析了湖南省 1960—2014 年农业干旱的时空演变特征, 主要结论如下。

(1) 对 1~12 个月尺度的 SPEI 而言, SPEI-6 在中南部多数地区的适宜性最好, 而 SPEI-4 或 SPEI-5 在北部地区(张家界、常德和湘西州部分地区)的适宜性最好。全省而言, SPEI-6 最适宜表征农业干旱发生情况。

(2) 1960—2014 年, 全省农业干旱总体呈不显著减小趋势。中度及以上干旱的发生频率为 14.4%, 频率较高的地区为湘西州、怀化市和永州市; 重度及以上干旱的发生频率为 4.9%, 频率较高的地区为怀化、湘西、永州和邵阳市。

(3) 在干旱季节分布上, 中度及以上干旱在冬季发生频率最高, 其次为秋季、夏季和春季。重度及以上干旱亦在冬季发生频率最高, 其次为春季、秋季和夏季。在年代际变化上, 农业干旱在 20 世纪 60 年代最高, 而后持续降低, 20 世纪 90 年代达到最低值, 21 世纪初又快速升高。

参考文献(References):

- [1] 裴源生, 蒋桂芹, 翟家齐. 干旱演变驱动机制理论框架及其关键问题[J]. 水科学进展, 2013, 23(4): 449-456. (PEI Y S, JIANG G Q, ZHAI J Q. Theoretical framework of drought evolution driving mechanism and the key problems[J]. Advances in Water Sciences, 2013, 23(4): 449-456. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2013.03.013.
- [2] IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fifth Assessment Report[R]. Cambridge University Press, 2014.
- [3] TRENBERTH, K, DAI, A, VAN DER SCHRIER, et al. Global warming and changes in drought[J]. Nature Climate Change 2014, 4: 17-22. DOI: 10.1038/nclimate2067.
- [4] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴: 2015 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China Water Conservancy Statistical Yearbook. 2015 [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2015. (in Chinese))
- [5] DAI, A. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nature Climate Change, 2013(3): 52-58. DOI: 10.1038/nclimate1633.
- [6] 何俊琦, 余锦华, 高歌, 等. 西南地区农业旱情的气象干旱指数适应性研究[J]. 气象科学, 2015, 35(4): 454-461. (HE J Q, YU J H, GAO G, et al. Research on the adaptability of meteorological arid index of agricultural drought in southwest China [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2015, 35(4): 454-461. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-1302.2015.15.067.
- [7] 范嘉智, 谭诗琪, 罗宇, 等. 湖南省最适干旱指数研究及近 50 年干旱演变分析[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(15): 291-295, 306. (FAN J Z, TAN S Q, LUO Y, et al. Study on optimal drought index of Hunan Province and analysis of drought evolution in the past five decades[J]. 2019, 47(15): 291-295, 306. (in Chinese)) DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2019.15.067.
- [8] 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 Y P, LI Y H. Advances in adaptability of meteorological drought indices in China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(5): 709-723. (in Chinese)) DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2017)05-0709.
- [9] 姚玉璧, 张强, 王劲松, 等. 中国西南干旱对气候变暖的响应特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1409-1417. (YAO Y B, ZHANG Q, WANG J S, et al. The response of drought to climate warming in southwest China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(9): 1409-1417. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2014.09.005.
- [10] 温庆志, 孙鹏, 张强, 等. 基于多源遥感数据的农业干旱监测模型构建及应用[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7757-7770. (WEN Q Z, SUN P, ZHANG Q, et al. An integrated agricultural drought monitoring model based on multi source remote sensing data: model development and application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7757-7770. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201711202068.
- [11] YANG, K, CHEN, Y Y, HE J, et al. Development of a daily soil moisture product for the period of 2002-2011 in mainland China[J]. Science China Earth Sciences. (in press) DOI: 10.1007/s11430-019-9588-5.
- [12] 张立杰, 李健. 基于 SPEI 和 SPI 指数的西江流域干旱多时间尺度变化特征[J]. 高原气象, 2018, 37(2): 560-567. (ZHANG L J, LI J. Spatiotemporal change of drought at various time scales indicated by SPEI

- and SPI in Xijiang River basin[J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(2): 560-567. (in Chinese) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00013.
- [13] 潘妮, 卫仁娟, 詹存, 等. 干旱指数在四川省的适用性分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(4): 71-78. (PAN N, WEI R J, ZHAN C, et al. Applicability analysis of drought indexes in Sichuan Province[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(4): 71-78. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2017.04.013.
- [14] 苗正伟, 徐利岗, 路梅. 基于 SPEI 指数的京津冀地区干旱特征分析[J]. *人民黄河*, 2018, 40(7): 51-57. (MIAO Z W, XU L G, LU M. Analysis of drought characteristics based on SPEI index in Beijing Tianjing Hebei region[J]. *Yellow River*, 2018, 40(7): 51-57. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2018.07.012.
- [15] 张弘, 王文卓, 李琼芳, 等. 不同干旱指数在唐山地区旱情评价中的应用[J]. *水资源保护*, 2013, 29(6): 64-69. (ZHANG H, WANG W Z, LI Q F, et al. Drought evaluation of Tangshan region using multiple drought indices[J]. *Water Resources Protection*, 2013, 29(6): 64-69. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2013.06.013.
- [16] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Boston, MA, 1993: 179-184.
- [17] PALMER W C. Meteorological drought. U. S. Weather Bureau Research Paper 45, Washington, DC, 1965.
- [18] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERIA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. *Journal of Climate*, 2010(23): 1696-1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
- [19] YU M X, LI Q F, HAYES M J, et al. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the standardized precipitation evapotranspiration index: 1951-2010[J]. *International Journal of Climatology*, 2014(34): 545-558. DOI: 10.1002/joc.3701.
- [20] 蔡思扬, 左德鹏, 徐宗学, 等. 基于 SPEI 干旱指数的东北地区干旱时空分布特征[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(5): 15-21. (CAI S Y, ZUO D P, XU Z X, et al. Spatiotemporal characteristics of drought in northeast China based on SPEI[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(5), 15-21. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2017.05.003.
- [21] 容锦盟, 周丹, 罗静, 等. 4 种干旱指标在华北地区气象干旱监测中的适用性分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(1): 259-267. (RONG J M, ZHOU D, LUO J, et al. Applicability analysis of four drought indices for meteorological drought monitoring in northern China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(1): 259-267. (in Chinese) DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2019.01.36.
- [22] TIAN L Y, YUAN S S, STEVEN Q. Evaluation of six indices for monitoring agricultural drought in the south central United States[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018(249): 107-119. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.11.024.
- [23] GUO M J, LI J, WANG, Y, et al. Spatiotemporal variations of meteorological droughts and the assessments of agricultural drought risk in a typical agricultural province of China[J]. *Atmosphere* 2019(10): 542. DOI: 10.3390/atmos10090542.
- [24] HUTCHINSON M F, XU T. Anusplin version 4. 2 user guide: centre for resource and environmental studies[M]. The Australian National University: Canberra, Australia, 2014.
- [25] ZHOU J, WANG Y J, SU B D, et al. Choice of potential evapotranspiration formulas influences drought assessment: A case study in China[J]. *Atmospheric Research*, 2020, 242(15): 1-15. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.104979.
- [26] SHEFFIELD J, WOOD E F, RODERICK M L. Little change in global drought over the past 60 years[J]. *Nature*, 2012(491), 435-438. DOI: 10.1038/nature11575.
- [27] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO[R]. Rome, 1998.
- [28] JACOBI J, PERRONE D, DUNCAN L L, et al. A tool for calculating the Palmer drought indices[J]. *Water Resources Research*, 2013(49): 6086-6089.
- [29] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [30] 中国气象灾害大典编委会. 中国气象灾害大典: 湖南卷[M]. 北京: 气象出版社, 2006. (Editor Committee of China Meteorological Disasters. China meteorological disasters: the volume of Hunan Province[M]. Beijing: Meteorological Press, 2006. (in Chinese))
- [31] 湖南统计局. 湖南农村统计年鉴: 2010 年版[Z]. 长沙: 湖南统计局, 2011. (Hunan Province Statistics Bureau. Rural statistical yearbook of Hunan Province: 2010[Z]. Changsha: Hunan Province Statistics Bureau, 2011. (in Chinese))

Scale of meteorological drought index suitable for characterizing agricultural drought:

A case study of Hunan Province

ZHUO Zhiyu¹, LONG Qiubo¹, BAI Peng²

(1. *Hunan Hydro and Power Design Institute, Changsha 410007, China;*

2. *Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Process,*

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) is one of the most widely used meteorological drought indexes globally for drought monitoring. Determining the appropriate SPEI time scale is the premise of using SPEI for monitoring agricultural drought. Taken the latest national soil moisture reanalysis products as a reference, the most suitable SPEI time scale for characterizing agricultural drought in Hunan Province is determined based on maximum correlation analysis and then the spatial and temporal evolution characteristics of agricultural drought in Hunan Province from 1960 to 2014 is analyzed. The results showed that: the most suitable timescale of SPEI to characterize agricultural drought is SPEI6 in the whole province; the agricultural drought characterized by SPEI6 showed an insignificant decrease trend from 1960 to 2014 in the whole province, the frequency of moderate and severe droughts was 14.4% on average, and the frequency of severe and extreme droughts was 4.9% on average; in terms of seasonal distribution, moderate and severe droughts have the highest frequency in winter, followed by autumn; severe and extreme droughts also have the highest frequency in winter, followed by spring; regarding interdecadal variations, the frequency of agricultural drought in the whole province was highest in the 1960s and then continued to decrease, reaching the lowest value in the 1990s and rapidly increasing in the 2000s.

Key words: meteorological drought; agricultural drought; Hunan Province; drought assessment; climate change

(上接第 91 页)

Simulation of runoff process and variation characteristic in Shaying River basin

GAN Rong^{1,2}, CHEN Changzheng^{2,3}

(1. *The Joint Institute of Internet of Water and Digital Water Governance, Tsinghua Ningxia Yinchuan,*

Beijing 100084, China; 2. *School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;*

3. *Henan Provincial Key Laboratory of Groundwater Pollution Prevention and Remediation, Zhengzhou 450001, China)*

Abstract: The groundwater recession curve in the Shaying River basin is fitted and compared by linear and nonlinear relationships. Based on the improved SWAT (soil and water assessment tool) model, the runoff process of the Shaying River basin was simulated, and the simulation effect was evaluated by the Nash Sutcliffe efficiency coefficient, percentage deviation, and determination coefficient. On this basis, the annual and interannual variation characteristics of the runoff process were analyzed. The results show that: the nonlinear fitting of the groundwater recession curve in the Shaying River basin was better than the linear fitting, and the simulation results of the model based on the nonlinear process were good; the surface runoff, the interflow, and the baseflow accounted for 55.5%, 25.4%, and 19.1% of the runoff, respectively, the runoff in winter was mainly supplied by the baseflow, the annual distribution of runoff was consistent with the change of precipitation, with obvious seasonal change and nonuniformity; the fluctuation of surface runoff and baseflow is consistent with the change of runoff, showing an upward trend, while the interflow shows a downward trend from 1961 to 2014.

Key words: runoff progress; surface runoff; baseflow; SWAT model; Shaying River