

基于简单气象因子的干旱指数 计算及其适用性分析

刘爽^{1,2,3}, 范兴科^{1,2,4}

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,陕西杨凌 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100;
3.中国科学院大学,北京 100049;4.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西杨凌 712100)

摘要:为建立可对短期干旱进行合理监测表征的气象干旱指数,从气象干旱发生的机制——水分供需矛盾(主要为降水量与蒸散量两大因素)出发,以旬尺度的蒸散缺水占需水量的比值定义一个气象干旱指数——缺水度指数(*WSI*),潜在蒸散量(*PET*)采用气温(*T*, °C)及相对湿度(*RH*, %)两大极易获取的气象因子计算,同时利用陕西省30个气象站点2000—2020年的逐日气象观测资料分析*WSI*的适用性特征。结果表明:在不考虑风和大气压的影响条件下,相对于Penman-Monteith方程,基于*T*和*RH*估算*PET*误差较小,均方根误差(*RMSE*)和平均绝对误差(*MAE*)均值分别为1.17 mm和0.82 mm,但62.1%的数据计算结果偏小,部分站点80%以上数据偏小。对陕西省不同区域近年来旱情发展变化的研究表明,*WSI*能够识别出陕西省旱情易发区域及时段,同时对于短期干旱事件具有较强的识别能力,较*MCI*指数能够更快地捕捉旱情发生,同时更加灵活简便,可以应用于气象干旱的监测预报和评估。

关键词:气象干旱;气温;相对湿度;缺水度指数(*WSI*);陕西省

中图分类号:S165⁺.25 **文献标志码:**A

Calculation and applicability analysis of drought index based on simple meteorological factors

LIU Shuang^{1,2,3}, FAN Xingke^{1,2,4}

(1. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to establish a meteorological drought index that can effectively monitor short-term droughts, this study, based on the mechanism of meteorological drought occurrence—namely the imbalance between water supply and demand (primarily influenced by precipitation and evapotranspiration), introduced a drought index termed the water scarcity index (*WSI*). This index was defined by the ten-day scale evapotranspiration deficit as a proportion of the water demand. The potential evapotranspiration (*PET*) was calculated using easily accessible meteorological factors: temperature (*T*, °C) and relative humidity (*RH*, %). Using daily meteorological observation data from 30 weather stations in Shaanxi Province from 2000 to 2020, we analyzed the applicability characteristics of *WSI*. The results indicated that, without considering the effects of wind and atmospheric pressure, the error in estimating *PET* based on *T* and *RH* was relatively small compared to the Penman-Monteith equation. The root mean square error (*RMSE*) and mean absolute error (*MAE*) were 1.17 mm and 0.82 mm. However, 62.1% of the data

收稿日期:2023-07-05

修回日期:2023-10-07

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0501703);唐仲英基金会资助项目;陕西省现代节水农业工程技术研究中心后补助项目(2021GCZX-16)

作者简介:刘爽(1998-),女,河北衡水人,硕士研究生,研究方向为农业水资源高效利用。E-mail:liushuang_361@163.com

通信作者:范兴科(1964-),男,陕西岐山人,研究员,主要从事节水灌溉新技术和灌溉产品开发研究。E-mail:gjfk@vip.sina.com

results were underestimated, with some stations having over 80% of data underestimated. Research on the recent drought development changes in different regions of Shaanxi Province showed that *WSI* can identify drought-prone areas and periods in Shaanxi. It also possesses a strong ability to recognize short-term drought events. *WSI* outperforms *MCI* in swiftly detecting droughts, offering greater flexibility and simplicity for monitoring, forecasting, and evaluating meteorological drought conditions.

Keywords: meteorological drought; air temperature; relative humidity; water scarcity index (*WSI*); Shaanxi Province

我国是一个农业大国,同时也是一个旱灾频繁的国家。由于独特的地理位置和气候条件,旱灾成为我国最严重的气象灾害,占农作物总受灾面积的 55%,是制约我国农业发展的重要因素之一^[1]。有研究表明,在本世纪中后期,我国将面临更加严重的干旱化趋势^[2],对我国的农业发展提出了更高挑战。

干旱通常分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱 4 种类型,其他 3 种类型的干旱与气象干旱存在因果关系,在发生的时序上存在滞后性,因此可以通过对气象干旱进行监测,做到早期预警和实时跟踪通报。目前,基于地面气象台站观测资料计算气象干旱指数仍是气象干旱监测的主要方法^[3-5]。我国使用较多的气象干旱指数有帕默尔干旱指数(*PDSI*)、标准化降水蒸散发干旱指数(*SPEI*)、相对湿度指数(*MI*)、气象干旱综合指数(*MCI*)等。*PDSI*^[6]综合考虑了前期降水量、土壤水、蒸散发、径流量等因素,能更加准确地分析研究区的干旱情况,但其所需要的数据资料过多,计算复杂,不利于推广应用。*SPEI*^[7]具有多时间尺度的优点,区域适应性强,但其需要提供长时间序列(一般最少 30 a)的台站历史数据资料以保证监测的准确性,对于气象数据时间较短地区的干旱监测结果不友好,不利于气象干旱的精细化监测。*MI*^[8]适用于作物生长季的干旱监测,但其蒸散量采用 Penman-Monteith(P-M)方程计算,所需气象因子的观测数据较多,同样不利于精细化监测。而 *MCI*^[9]组合了不同时间尺度的标准化降水指数(*SPI*)与 30 d 尺度的 *MI*,在我国大部分地区得到了应用分析,是国家气候中心正在使用的干旱指数,但其同 *SPEI* 一样,需要站点历史观测数据,计算较为复杂;且 *MCI* 中蒸散占比不大,同时考虑的时间尺度较长,存在对骤发干旱监测不到位及对有效降水不敏感的问题^[10-11]。

骤发干旱是气象条件驱动下的短期农业干旱,当前气候背景下,极端天气发生频繁,骤发干旱正在成为未来干旱发展的新方向^[12]。与传统干旱相比,骤发干旱的持续时间一般较短,常用的月及以

上尺度的干旱指数对其监测预警的效果较差。同时骤发干旱对农业危害较大,如果作物在发芽、授粉和灌浆等对水分需求较大的生长关键阶段遭遇骤发干旱,产量会显著降低^[13]。过去十几年中,我国发生了几起严重的骤发干旱事件,造成了非常大的经济损失^[14]。

基于此,本研究从气象干旱发生机制,即大气水量的供(降水)需(蒸散)平衡出发,提出基于蒸散发缺水量与耗(需)水量之比的短时间尺度的气象干旱指数,通过逐日更新的气象数据计算实时干旱指数,同时简化蒸散量的计算方法,以实现利用简单气象因子进行区域气象干旱精细化监测的目标,从而为农业抗旱提供指导依据。

1 数据资料及研究方法

1.1 数据资料

研究所用数据为陕西省 30 个地面气象观测站 2000—2020 年的逐日气象资料,主要包括气温、降水、风速、空气湿度、日照时数等,部分缺测数据采用多年同期平均值方法补齐,降水量缺测值利用附近气象观测站的降水量算术平均值补齐,具体站点分布情况如图 1(见 246 页)所示。

1.2 干旱指数构建

1.2.1 干旱指数定义 气象干旱是指由于某时段内的蒸散量及降水量的收支不平衡导致的地表水分短缺现象。考虑到极端降水可能产生水土流失和深层渗漏等损失,其损失部分不能参与计算区域内的水分支出,为了能够更准确地反映出某一区域的水分短缺程度,本研究将旬尺度的潜在蒸散量(Potential evapotranspiration, *PET*)与有效降水量 P_e 的差值占 *PET* 的比值,定义为缺水度指数(Water scarcity index, *WSI*),作为评价干旱程度的参数,其计算公式如下:

$$WSI = \frac{PET - P_e}{PET} \quad (1)$$

式中, *PET* 和 P_e 分别为旬尺度的逐日潜在蒸散量总和(mm)及有效降水量总和(mm)。

1.2.2 *PET* 计算方法 *PET* 是指在保持水分充分供给的土壤或水面经蒸发和植物蒸腾作用能够达到的最大蒸发量,反映大气的蒸发能力^[15]。影响 *PET* 的主要因素为空气温度、空气相对湿度、风和气压。温度是能量的反映,在相同大气压条件下,气温越高,空气中所能容纳的气态水分子就越多。在相同的气压和温度条件下,空气中的水分子含量越少,即相对湿度越低,根据分子运动原理,热的水分子向空气中扩散的动力就越强,扩散越快,扩散的量越多,理论上当空气的相对湿度达到 100% 时,水分子的扩散就会达到一个动态的平衡,停止蒸散发,所以空气中水分子的容量多少主要与空气的温度和相对湿度有关。而风和气压是通过改变空气的温度和相对湿度间接地影响蒸发过程,进而影响 *PET*。风的影响与风速大小有关,尽管影响较大,但多为短时效应;同一海拔条件下,气压的变化幅度相对较小,除阴晴突变外,总体影响不大。因此,用空气温度和空气相对湿度可以近似的计算对应时段的 *PET*。

通过对标准大气压条件下不同温度时单位体积干空气中所能容纳的最大水分含量(即饱和水含量, M_{mois}) 进行相关性回归,在 $-20 \sim 60^\circ\text{C}$ 区间得到以下关系:

$$M_{\text{mois}} = 4.45 \times 1.065^T \quad R = 0.995 \quad (2)$$

式中, T 为空气温度($^\circ\text{C}$)。

根据在无风和大气压基本不变的条件下,不同温、湿度下测定的蒸发量,通过分析整理得到基于空气温度和湿度,以天(d)为计算时段的 *PET* 计算公式如下:

$$PET = 1.9 \times (1 - RH) \times 1.065^T \quad (3)$$

式中, T 为温度($^\circ\text{C}$); RH 为相对湿度(%)。

该公式适用于 $-20 \sim 60^\circ\text{C}$ 标准大气压下逐日 *PET* 的计算,在由于不同海拔高度而产生的非标准大气压地区可采用下式进行校正:

$$PET = 1.9 \times k \times (1 - RH) \times 1.065^T \quad (4)$$

$$k = 1 + 0.0007H \quad (5)$$

式中, k 为修正系数; H 为海拔(m)。

1.2.3 P_e 确定方法 P_e 的大小与降水总量、降水强度、地形、土壤质地和植被特征等息息相关^[16]。为了简单通用,经过综合分析,本研究仅以地形、日最大降水量 P_{max} 、最大平均降水强度 i_{max} 共 3 个因素作为确定有效降水量的限制条件,具体划分见表 1。 P_e 在相应地形条件下,不能超过 P_{max} ,同时在有逐

小时降水强度 i_h 数据的情况下, i_h 不能大于 i_{max} 。

1.2.4 干旱等级划分 *WSI* 等级划分方法参考《气象干旱等级》^[17] 确定,各等级干旱类型及数值范围见表 2。

表 1 有效降水量确定的限制因素

Table 1 Restrictions of effective precipitation

地形 Topography	P_{max}/mm	$i_{\text{max}}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$
山地 Mountainous region	30	1.8
平原 Plain	50	3.0

表 2 缺水度指数干旱类型等级划分

Table 2 Drought classification based on water scarcity index

等级 ID	类型 Classification	阈值 Threshold
1	无旱 Normal	$WSI < 0.40$
2	轻旱 Mild drought	$0.40 \leq WSI < 0.60$
3	中旱 Moderate drought	$0.60 \leq WSI < 0.75$
4	重旱 Severe drought	$0.75 \leq WSI < 0.90$
5	特旱 Extremely drought	$0.90 \leq WSI \leq 1.00$

1.3 温湿度模型计算 *PET* 可信度检验

本研究采用 FAO-56 推荐的 P-M 方程对温湿度模型计算的 *PET* 进行检验,具体计算方法见参考文献^[18]。选用均方根误差(*RMSE*)、平均绝对误差(*MAE*)、平均绝对百分比误差(*MAPE*)、一致性系数(d)、拟合优度(R^2) 等指标表征温湿度模型与 P-M 方程计算 *PET* 的误差及一致性情况。通常 *RMSE*、*MAE* 及 *MAPE* 越小, d 和 R^2 越接近于 1,代表温湿度模型计算 *PET* 准确性越高。具体计算方法见参考文献^[19-21]。

2 结果与分析

2.1 温湿度模型与 P-M 方程结果对照

本研究根据乔丽等^[22] 对陕西省生态农业干旱区划的研究结果,在陕西省的 8 个生态农业气候干旱相似区中各选取一个站点进行温湿度模型计算 *PET* 的检验。各站点的统计分析指标结果如表 3 所示。对于全部数据序列(21 a 的逐日 *PET*),与 P-M 方程计算结果相比,温湿度模型的 *RMSE* 介于 0.97 ~ 1.55 mm,除横山、绥德外的其余 6 个站点的 *RMSE* 均小于 1.30 mm;各站点的 *MAE* 均低于 1.00 mm,最低为延长站,为 0.71 mm;各站点的 *MAPE* 在 30% 左右浮动,最大为 34%,最小为 26%; d 的取值为 0.86 ~ 0.93,除镇坪外,其余 7 个站点均不低于 0.90;8 个站点的 R^2 均大于 0.75,最大为 0.81。总体上看,利用

温湿度数据计算 *PET* 与 P-M 方程计算得到的结果吻合较好,是一种可行的 *PET* 简便计算方法。

2.2 不同时间尺度下干旱频率变化特征

利用 2000—2020 年的气象资料计算不同时间尺度下的 *WSI* 均值,分析陕西省干旱频率的变化特征。结果发现,季尺度下,干旱频率呈现出由北向南逐渐减小的趋势,其中冬季和春季的干旱频率明显高于夏秋两季(图 2,见 246 页),部分站点冬旱及春旱频率可达 100%,且多分布在陕北地区。陕西省冬旱频率为 89.7%,其中,陕北地区冬旱平均频率为 97.5%,并以特旱为主,特旱频率达到 40.0%;关中地区冬旱频率为 90.0%,以重旱为主,重旱频率为 44.5%;陕南地区冬旱频率最小(84.2%),且旱情较轻,以轻中旱为主,总计频率为 50.3%。春旱也是陕西省干旱的一个主要类型,与冬旱类似,春旱发生的高频地区同样集中在陕北,频率为 97.0%;关中达到 68.1%,而陕南不足 30.0%。陕西省夏旱频率较低,三分之一以上的站点夏旱频率不足 15.0%,其中,陕南地区夏旱频率仅为 2.0%,关中地区为 25.2%,而陕北地区夏旱频率较高,达到 56.0%。陕西省秋旱频率最低,均值为 12.7%,陕南地区秋旱频率为 0.8%,仅石泉、略阳站点分别监测到一次轻度秋旱及中度秋旱;关中地区为 6.2%,陕北地区秋旱频率最高,为 38.7%。

月尺度下,干旱频率空间分布特征与季节尺度一致,自陕南向陕北逐渐升高,其中陕北北部的定边、榆林干旱频率较高,全年均值分别为 89.6% 和 79.7%,是陕北旱情高发区域;关中地区旱情高发区域以蒲城、耀县为主,干旱频率分别为 72.6%、63.8%;全省干旱频率最低的地区为陕南地区的宁强,平均干旱频率为 16.9%。时间分布上,2 月份和 9 月份为全年月干旱频率的拐点(图 3),2 月份干旱

频率达到最高,全省均值为 86.8%;2 月份开始逐渐下降,9 月份达到最低,全省均值为 8.9%。整体而言,1 月、2 月和 12 月是陕西省旱情高发月,干旱频率均高于 80%;8—10 月全省干旱频率较低,分别为 18.1%、8.9% 和 24.9%,其中,陕南地区干旱频率最低,不足 10.0%。

考虑到夏季气温较高,农作物需水量大,若此时发生气象干旱,旱情会迅速发展,故选取 6—8 月的 *WSI* 值计算旬尺度干旱频率,进一步分析更短时间尺度的旱情高发时间及区域,从而为农业抗旱提供更精确的指导。由图 4 可以看出,6 月中上旬是陕西省夏季旱情高发期,除陕南地区的宁强站点外,其余站点干旱频率均在此时间段达到峰值,峰值干旱频率介于 19.0%~100.0%。6 月上旬全省干旱频率均值为 60.8%,陕南、关中及陕北地区分别为 33.7%、67.6% 和 92.9%。6 月中旬全省干旱频率均值为 65.1%,略高于 6 月上旬,其中陕南及关中地区干旱频率较 6 月上旬有所升高,分别为 38.5% 和 77.1%;而陕北地区干旱频率为 89.9%,较 6 月上旬有所下降。陕南地区的安康、汉中、略阳及商县站点 6—8 月的旬尺度干旱频率均值均高于 30.0%,关中地区的蒲城、秦都区及耀县 6—8 月旬尺度干旱频率均值分别为 67.7%、60.8% 和 56.6%;陕北以定边、横山及靖边为旱情高发区域,6—8 月旬尺度干旱频率均值均大于 75.0%。

2.3 *WSI* 对陕西省典型干旱事件的表征能力

查阅资料发现,2000 年 2—7 月、2008 年入冬以后、2014 年夏季和 2016 年夏秋季陕西省部分地区均出现不同程度的旱情。利用 *WSI* 对这 4 起干旱事件进行分析,以检验 *WSI* 的表征能力,由于篇幅所限,考虑到夏季气温较高,区域水循环速度较快,主要对其中两起夏旱事件进行讨论。

表 3 温湿度模型计算 *PET* 统计指标值

Table 3 Calculating the statistical index values of *PET* using the temperature and humidity model

生态区编号 Ecological region ID	站点名 Station name	RMSE /mm	MAE /mm	MAPE /%	<i>d</i>	<i>R</i> ²
1	横山 Hengshan	1.55	0.96	32	0.90	0.81
2	绥德 Suide	1.55	0.96	30	0.91	0.79
3	延长 Yanchang	0.99	0.71	26	0.92	0.77
4	蒲城 Pucheng	1.24	0.85	30	0.92	0.77
5	凤翔 Fengxiang	1.01	0.74	29	0.93	0.79
6	汉中 Hanzhong	1.00	0.77	34	0.90	0.76
7	镇坪 Zhenping	1.08	0.85	32	0.86	0.78
8	商县 Shangxian	0.97	0.75	28	0.91	0.77

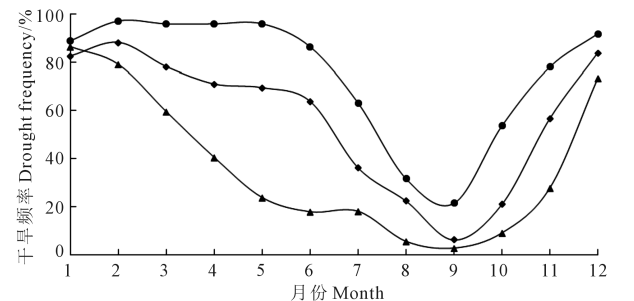


图 3 月尺度干旱频率变化曲线

Fig.3 Variation curve of drought frequency at the monthly scale

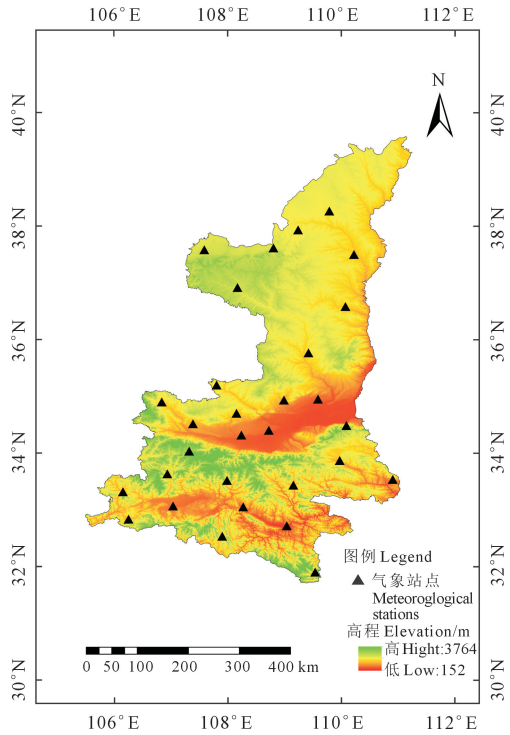


图 1 陕西省气象站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in Shaanxi Province

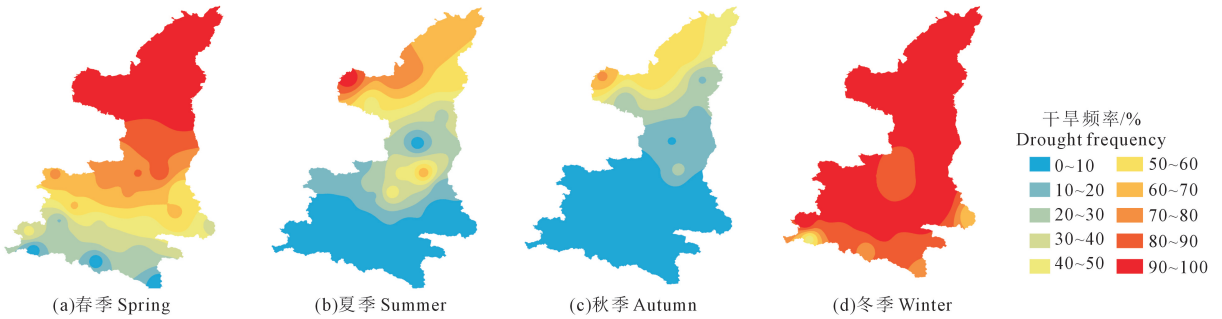


图 2 季尺度干旱频率空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of drought frequency at the seasonal scale

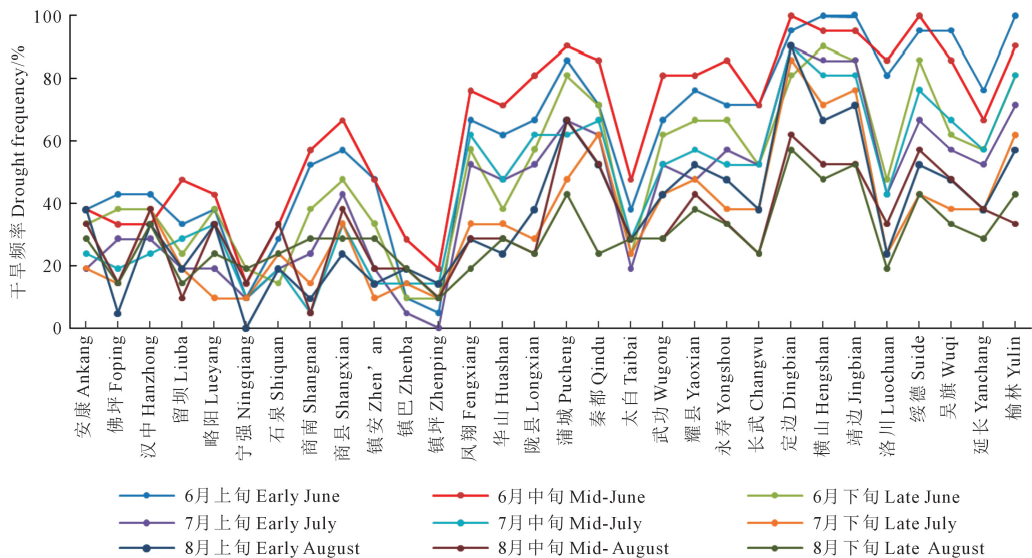


图 4 旬尺度干旱频率变化曲线

Fig.4 Change curve of drought frequency at the ten-day scale

2.3.1 WSI 对 2014 年夏旱的表征能力 2014 年 6—8 月上旬,陕西关中及陕南地区高温少雨,大部分地区发生中到重旱,对此次干旱事件以 WSI 逐旬均值进行分析,以旬均值作为当旬的旱情总体状态。如图 5 所示,从 6 月上旬开始,由于持续缺少降水且进入夏季,气温升高使得 PET 迅速增大,全省除镇安、镇巴、宁强外,其余站点 WSI 均值均大于 0.4,且自南向北逐渐加大,这与陕西省的气候密不可分。陕北地区属于干旱半干旱气候区, PET 较大,在同等降水条件下,旱情发展较关中及陕南地区快。6 月中旬,陕南地区降水量普遍超过 30 mm,除商南外的其余站点 WSI 值均低于 0.4;关中地区此时段平均降水量为 22 mm,且前期旱情较重,故降水对缓解旱情作用不大;陕北地区的靖边、定边、横山和榆林降水量均不足 5 mm,在其高 PET 背景下, WSI 值均大于 0.9,而其他地区平均降水量达到 20 mm,旱情没有进一步发展,甚至部分降水量较大地区(如延长),旱情得以减轻。6 月下旬,全省平均降水量为 20.6 mm,70% 站点的 WSI 值降至 0.6 以下,旱情等级及区域明显缩小。7 月上旬,关中中西部地

区及陕西南部地区出现新一轮旱情,其中,略阳、留坝、武功 WSI 值大于 0.8,3 个站点 6 月下旬降水量均不足 10 mm,且大规模降水发生在 7 月 9 日和 7 月 10 日,对当旬旱情缓解作用较小, WSI 值仍较大;但本次降水对 7 月中旬旱情起到了明显的抑制作用,尽管 7 月中旬关中地区多数站点降水量不足 3 mm,凤翔、秦都区、永寿为 0 mm,但 WSI 均值无明显变化。7 月下旬,关中地区高温少雨的情况继续发展,其中西部旱情最为严重,永寿连续 20 d 没有降水,凤翔、陇县、长武、武功 20 d 的总降水量均不足 3 mm, WSI 值超过 0.9;陕北南部及西北部地区降水量偏少,出现轻度到重度旱情;陕南降水分布不均,商南、商县降水达到 40 mm 以上,但 WSI 显示这些地区仍存在中重度旱情,其他地区降水量相对较少,多数地区不足 10 mm, WSI 值有所升高。8 月上旬,全省降水量大幅增加,陕北、关中和陕南地区降水量均值分别为 40.8、67.3 mm 和 67.4 mm,旱情程度下降,范围进一步缩小。安康、略阳虽降水较多,但两次降水时间间隔较长,连续 13 d 没有降水,由无旱转变为中旱状态。8 月中旬,全省大部分地区恢复至无旱状态,但榆林地区自 7 月中旬以来降水量始终偏低,41 d 的总降水量仅 26.5 mm,为同期 PET 的 10.0% 左右, WSI 值仍大于 0.9。就全省范围而言,本次夏旱过程基本结束。

2.3.2 WSI 对 2016 年夏秋连旱的表征能力 2016 年,陕西南部发生夏秋连旱,对此次干旱事件仍以 WSI 逐旬均值进行分析。图 6 显示,本次干旱过程从 7 月下旬开始,自北向南逐渐发展,至 9 月下旬基本结束。7 月下旬,陕北地区北部的榆林、定边、靖边降水偏少,分别为 5.2、5.1 mm 和 0.8 mm,出现轻度到重度旱情, WSI 值分别为 0.61、0.89、0.90。8 月上旬,陕北北部旱情开始加重,且干旱范围逐渐向陕北南部及关中北部地区发展,除洛川外,陕北地区其余站点 8 月上旬降水量均不足 5 mm,榆林、靖边、横山降水量为 0 mm, WSI 均大于 0.9。除永寿外,关中西北部地区降水不足 5 mm,其中,蒲城、耀县自 7 月下旬以来降水一直偏少,21 d 降水量不足 5 mm,旱情达到特旱级别;陇县、秦都区由于 7 月下旬降水量较多,旱情较轻。8 月中旬,陕西北部由于降水增加,旱情恢复至无旱状态,部分地区存在小范围的轻度干旱,如定边和吴旗, WSI 分别为 0.44 和 0.52。关中地区继续保持高温少雨,旱情持续发展,除凤翔外,其余 9 个站点降水不足 3 mm,6 个站点降水量为 0 mm,蒲城、耀县 WSI 仍大于 0.9。与此同时,长武、武功也发展为特旱状态,旱情整体呈现

由外向内逐渐加剧的形势。陕南地区也呈现出与关中地区较为一致的旱情形势,中部石泉旱情最重,向外部逐渐减弱。8 月下旬,关中地区除耀县外,其余站点降水量有所提高,旱情得到不同程度的缓解;陕南地区平均降水量为 10.2 mm,高温背景下 WSI 持续升高,其中汉中、商南、石泉、镇安连续 20 d 的降水量不足 5 mm,使得 WSI 大于 0.9,出现特旱旱情。9 月上旬,降水量普遍偏少,全省降水量均值为 6.7 mm,除宁强处于无旱状态外,其他站点均出现不同程度的旱情,以重度干旱为主,陕北北部的榆林、绥德、关中地区耀县和陕南地区部分旱情发展为特旱,全省平均 WSI 为 0.81,达到重旱级别。9 月中旬至下旬,随着降水提升及气温下降,全省旱情自西向东逐步缓解。中旬时,陕北中西部、关中西部及陕南西部恢复至无旱状态,其余大部分地区存在轻度至中度旱情,个别地区存在重度旱情,如耀县 60 d 的总降水量仅 20.2 mm, WSI 值达到 0.89;下旬时,全省基本恢复无旱状态,仅个别地区存在小范围轻、中度旱情,本次夏秋连旱过程基本结束。

3 讨论

3.1 温湿度模型计算 PET 的合理性与不足

PET 的计算对于干旱监测的准确性来说至关重要,构建结构形式简单、计算精度较高的计算方法,对于实时快捷地进行干旱监测具有重要意义。研究表明,在日尺度及更长时间尺度下,气温和相对湿度可较好地体现出各气象因子对 PET 的综合作用^[23]。本研究利用气温和相对湿度两个气象因子计算 PET ,并在 8 个站点与 P-M 方程计算结果进行了检验分析,结果表明,在日尺度下温湿度模型与 P-M 方程计算结果的 $RMSE$ 与 MAE 均值分别为 1.17 mm 和 0.82 mm, $MAPE$ 均值为 30.1%, d 和 R^2 的均值分别为 0.91 和 0.78,误差整体较小,一致性系数和拟合优度较高;但在 21 a 的全部数据序列中,62.1% 的数据计算结果相对 P-M 方程偏小,其中镇坪站点最高可达 84.6%。 PET 的大小同时取决于太阳辐射带来的能量供给及饱和水汽压差 (VPD) 和风速提供的水汽输送条件^[24],气温和相对湿度仅能侧面反映太阳辐射和 VPD 对于 PET 的影响,而风速对 PET 的影响在本研究中没有体现。在数据有限的条件下,气温、相对湿度和风速是最需要被考虑的 3 个气象因子^[25]。本研究忽略了风速对于 PET 的正相关影响^[26],使得多数站点计算值偏小。在后续研究中,需进一步考虑不同时间尺度下风速对于 PET 的影响,完善模型,从而提高利用简单、易获取的气象因子计算 PET 的精度。

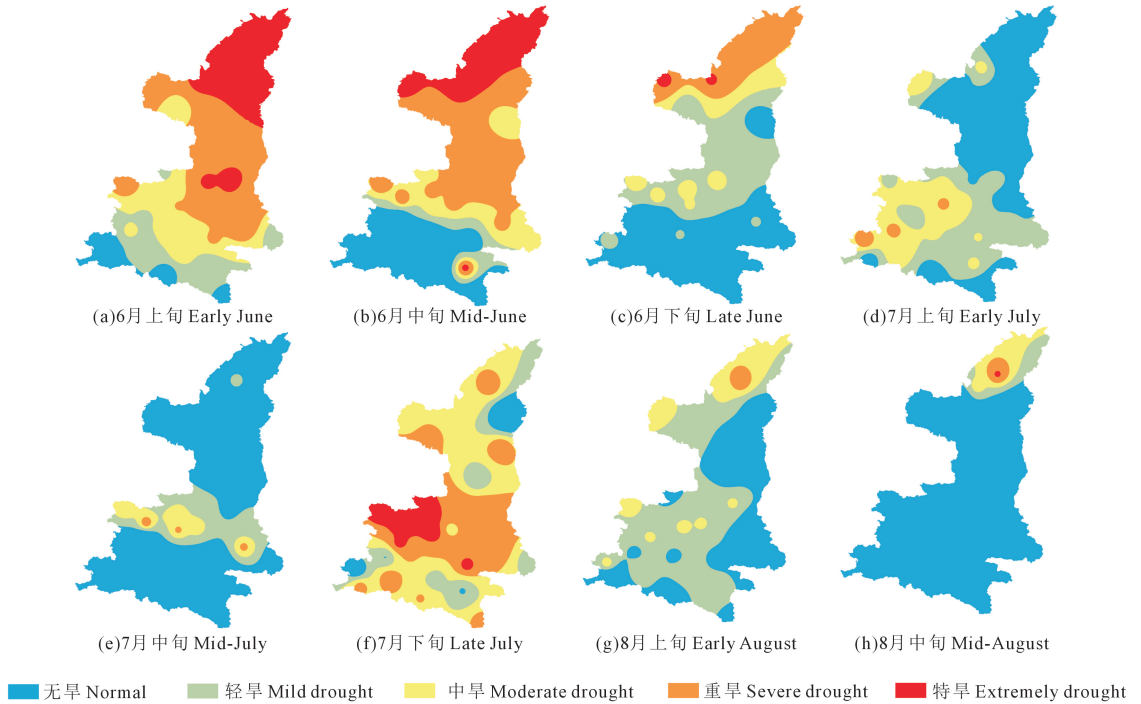


图 5 2014 年夏旱事件发展过程

Fig.5 The development process of summer drought event in 2014

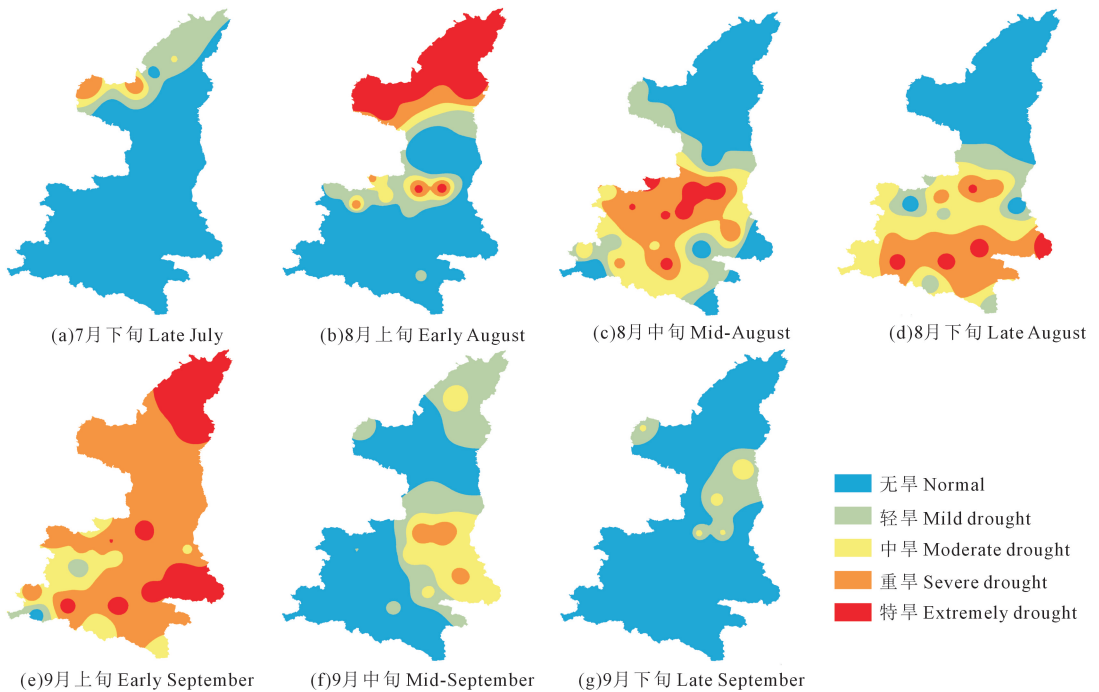


图 6 2016 年夏秋连旱事件发展过程

Fig.6 The development process of summer and autumn continuous drought event in 2016

3.2 WSI 表征的陕西省干旱特征

对不同时间尺度下干旱频率的分析表明,陕西省较易发生气象干旱,且多集中在陕北及关中地区,造成这个现象的主要原因是秦岭阻隔了来自南方的水汽,导致陕北及关中地区降水偏少^[27]。空间上,各个时间尺度的干旱频率分布均呈现出北高南

低的特征,这与蔡新玲等^[28]的研究结果一致。季节尺度上,冬旱和春旱是陕西省的主要气象干旱类型,其中,冬旱频率最高,为 88.9%,春旱为 60.5%,秋旱频率最低,不足 15.0%,这与陕西省的降水年内分布有着密切关系。月尺度上对旱情高发期的分析结果与季节尺度基本相同,12 月~次年 6 月是陕

北及关中地区的旱情高发期,而陕南地区则为 12 月~次年 3 月,平均干旱频率均高于 60.0%。旬尺度上的分析结果表明,陕北及关中地区夏旱以 6 月中上旬为高发期,平均干旱频率为 81.9%,同时本时间段农作物耗水量高,对农业影响较大。

3.3 WSI 对干旱事件的表征分析

本研究使用 WSI 对陕西省的两起典型夏旱事件进行了详细分析,发现 WSI 对于具体干旱事件的描述能力较强,能够体现出旱情的整体变化过程,但在旱情具体发展变化过程上与国家气候中心使用的 MCI 指数的监测结果相比仍存在一些差异。比如在 2014 年的夏旱事件中,WSI 监测到 6 月中上旬蒲城、耀县旱情较重,5 月 11 日—6 月 18 日的 PET 值分别为 228 mm 和 208 mm,而降水量总和分别只有 24.1 mm 和 21.8 mm,仅达到同时期 PET 的 10%左右,但同时期 MCI 监测结果(即全国气象干旱综合监测图)显示该地区始终为无旱状态(http://cmdp.ncc-cma.net/extreme/dust.php?product=dust_moni)。同样的情况也出现在 2016 年的夏旱事件中,7 月下旬—8 月上旬蒲城和耀县的降水量总和分别只有 1.3 mm 和 2.9 mm,而 MCI 监测结果仍显示其为无旱状态,直到 8 月中旬 MCI 才监测到这次旱情,这体现出 WSI 不仅能够监测到较短历时的旱情,对于旱情发生的识别也较为灵敏,能够较早地识别出旱情。而在 2016 年的夏秋连旱事件中,9 月中旬陕南西部地区降水量普遍达到 60 mm 以上,MCI 监测结果显示该地区旱情由中重度缓解至轻中度,而 WSI 则由中重度恢复至无旱状态,这体现出 WSI 对于有效降水的敏感性,当有效降水产生时,WSI 能够对其迅速反应,从而提供更加准确的旱情发展变化过程。

在夏季,影响 PET 变化的主要气象因子为气温^[29],当气温偏高时,PET 会迅速增加,在此期间,如果持续没有降水发生,旱情会迅速发展,而 MCI 考虑的时间尺度过长,对于最近的天气变化不敏感,往往不能及时预警,且容易忽略掉一些历时较短的干旱事件。干旱指数时间尺度的选择对于干旱监测的准确性来说非常重要,过短或过长都会影响监测效果^[30]。当前气候变暖背景下,我国农业区域的骤发性干旱次数正在逐渐增加,且一般发生在作物生长季,不同生育时期遭遇骤发性旱会对作物造成不同的影响,但最终都会降低产量^[31-32]。本研究目的是希望准确及时地为农业干旱提供预警预报服务,而 WSI 对于短期内的气象因子变化较为敏感,能够提供较为准确的短期旱情发展状况,可

以考虑将其应用于旱情监测与评估。本研究没有考虑前期土壤水分的影响,且当其在冬春季使用时,由于 PET 较小,可能会使 WSI 监测结果较实际偏重,仍需在后续的农业实践中根据旱情发展的实际情况对 WSI 进行改进,以优化其监测效果。

4 结 论

本研究基于陕西省 2000—2020 年 21 a 的逐日气象资料,从气象干旱发生机制出发,考虑降水和蒸散两大因素,提出了新的干旱指数 WSI,并以温湿度模型作为其 PET 的简便计算方法,评估了该模型与 P-M 方程的拟合效果,同时通过分析不同时间尺度下 WSI 监测的陕西省的干旱特征及其对典型干旱事件的表征能力,得出如下结论:

(1) 采用极易获得的气温和相对湿度两个气象因子估算 PET 的误差较小,一致性系数和拟合优度较高,在缺少部分气象资料的条件下,可作为一种理想的估算 PET 的简便方法。

(2) 陕西省较易发生气象干旱,冬旱和春旱是其主要类型,12 月~次年 6 月为陕北及关中地区旱情高发期,陕南为 12 月~次年 3 月。陕西省的干旱频率自南向北逐渐增大,陕北及关中地区是旱灾高发区域,且其 6 月中上旬较易发生夏旱,此时作物耗水量较大,需重点关注。

(3) WSI 对于干旱事件的识别能力较强,不仅能够识别出被 MCI 忽略的短期干旱事件,同时能在干旱事件发生初期快速反应,捕捉到旱情发生,较 MCI 更为灵活、简便,可以考虑将其应用于气象干旱监测与评估,为农业干旱提供指导依据。但在后续的农业实践中仍需结合旱情发展的实际情况对 WSI 进行改进,以优化其监测效果。

参 考 文 献:

- [1] 张庆云, 陶诗言, 彭京备. 我国灾害性天气气候事件成因机理的研究进展[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 815-825.
ZHANG Q Y, TAO S Y, PENG J B. The studies of meteorological disasters over China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 815-825.
- [2] 莫兴国, 胡实, 卢洪健, 等. GCM 预测情景下中国 21 世纪干旱演变趋势分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1244-1256.
MO X G, HU S, LU H J, et al. Drought trends over the terrestrial China in the 21st century in climate change scenarios with ensemble GCM projections[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(7): 1244-1256.
- [3] 牛乾坤, 刘浏, 程淑雅, 等. 基于多源遥感数据的河套灌区干旱时空演变特征[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 266-277.
NIU Q K, LIU L, CHENG J Y, et al. Spatiotemporal characteristics of drought in the Hetao irrigation district based on remote sensing data from multi-sources[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020,

- 38(4): 266-277.
- [4] 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.
- [5] 沈彦军, 李红军, 雷玉平. 干旱指数应用研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 128-133, 186.
SHEN Y J, LI H J, LEI Y P. Research review on application of drought index[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 128-133, 186.
- [6] PALMER W C. Meteorological drought[R]. Washington: US Department of Commerce, 1965.
- [7] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [8] 张青雯, 崔宁博, 赵禄山, 等. 基于相对湿润指数的云南省季节性干旱变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 278-284.
ZHANG Q W, CUI N B, ZHAO L S, et al. Seasonal drought characteristics based on relative moisture index in Yunnan Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 278-284.
- [9] 冯冬蕾, 程志刚, 吴琼, 等. 基于 MCI 指数的东北地区 1961-2014 年气象干旱特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(10): 118-124.
FENG D L, CHENG Z G, WU Q, et al. Meteorological drought characteristics in Northeast China from 1961 to 2014 based on the comprehensive monitoring index analysis[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(10): 118-124.
- [10] 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 Q, YAO Y B, LI Y H, 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.
- [11] 谢五三, 张强, 李威, 等. 干旱指数在中国东北、西南和长江中下游地区适用性分析[J]. 高原气象, 2021, 40(5): 1136-1146.
XIE W S, ZHANG Q, LI W, et al. Analysis of the applicability of drought indexes in the Northeast, Southwest and middle-lower reaches of Yangtze river of China[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(5): 1136-1146.
- [12] 纪瑞鹏, 于文颖, 冯锐, 等. 骤发干旱对农作物生长过程的影响机制与评估研究进展[J]. 生态学杂志, 2023, 42(11): 2737-2746.
JI R P, YU W Y, FENG R, et al. Research advances in effect mechanism and evaluation of flash drought on crop growth process[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(11): 2737-2746.
- [13] 张霞, 段亚雯, 段建平, 等. 基于蒸散发构建的日干旱指数及其对区域干旱事件的表征分析[J]. 中国科学(地球科学), 2022, 52(3): 540-558.
ZHANG X, DUAN Y W, DUAN J P, et al. A daily drought index based on evapotranspiration and its application in regional drought analyses[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(3): 540-558.
- [14] PAN Y, ZHU Y H, LV H S, et al. Accuracy of agricultural drought indices and analysis of agricultural drought characteristics in China between 2000 and 2019[J]. Agricultural Water Management, 2023, 283: 108305.
- [15] 白爱娟, 假拉, 徐维新. 基于潜在蒸散量对青海湖流域干旱气候以及影响因素的分析[J]. 干旱区地理, 2011, 34(6): 949-957.
BAI A J, JIA L, XU W X. Evaporation and its impact upon drought climate around the Qinghai Lake Basin based on potential evaporation [J]. Arid Land Geography, 2011, 34(6): 949-957.
- [16] 蒋忙舟. 黄土高原典型退耕草地植被特征对土壤入渗过程的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 99-104, 111.
JIANG M Z. Effects of vegetation characteristics on soil infiltration process in typical abandoned grasslands on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 99-104, 111.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级: GB/T 20481-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Grades of meteorological drought: GB/T 20481-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [18] 曹永强, 李可欣, 任博, 等. 基于 SPEI 的辽宁省气象干旱特征及驱动因素分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 28-36.
CAO Y Q, LI K X, REN B, et al. Characteristics and driving factors analysis of meteorological drought in Liaoning Province based on SPEI [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5): 28-36.
- [19] 徐俊增, 彭世彰, 丁加丽, 等. 基于蒸渗仪实测数据的日参考作物蒸发腾发量计算方法评价[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1497-1505.
XU J Z, PENG S Z, DING J L, et al. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration based on lysimeter grass experiments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(12): 1497-1505.
- [20] CHANG X M, WANG S L, GAO Z Y, et al. Forecast of daily reference evapotranspiration using a modified daily thornthwaite equation and temperature forecasts[J]. Irrigation and Drainage, 2019, 68(2): 297-317.
- [21] DESPOTOVIC M, NEDIC V, DESPOTOVIC D, et al. Review and statistical analysis of different global solar radiation sunshine models [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52: 1869-1880.
- [22] 乔丽, 杜继稳, 江志红, 等. 陕西省生态农业干旱区划研究[J]. 干旱区地理, 2009, 32(1): 112-118.
QIAO L, DU J W, JIANG Z H, et al. Classification of ecological agricultural droughts in Shaanxi Province [J]. Arid Land Geography, 2009, 32(1): 112-118.
- [23] 苏彦尹, 范兴科. 基于称重法对影响蒸发蒸腾量的主要气象因子研究分析[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(3): 40-48.
SU Y Y, FAN X K. Study of main meteorological factors affecting evapotranspiration based on gravimetric method [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(3): 40-48.
- [24] 范伶俐, 郭品文, 管勇, 等. 广东蒸发皿蒸发量的变化特征及成因[J]. 地理学报, 2010, 65(7): 863-872.
FAN L L, GUO P W, GUAN Y, et al. Changes in pan evaporation and its cause over Guangdong [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(7): 863-872.
- [25] VALIPOUR M. Analysis of potential evapotranspiration using limited weather data [J]. Applied Water Science, 2017, 7(1): 187-197.
- [26] 冯禹, 付萧, 崔宁博, 等. 四川省参考作物腾发量时空分布特征及成因分析[J]. 中国农村水利水电, 2014, (10): 61-64.
FENG Y, FU X, CUI N B, et al. Temporal and spatial distribution

- characteristics and causal analysis of reference crop evapotranspiration in Sichuan Province[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014, (10): 61-64.
- [27] 周丹, 张勃, 任培贵, 等. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50a 干旱特征分析[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(4): 677-688.
ZHOU D, ZHANG B, REN P G, et al. Analysis of drought characteristics of Shaanxi Province in recent 50 years based on standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(4): 677-688.
- [28] 蔡新玲, 叶殿秀, 李茜, 等. 基于 CI 指数的陕西干旱时空变化特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(5): 1-8.
CAI X L, YE D X, LI Q, et al. Analysis of temporal-spatial variation characteristics of drought in Shaanxi Province based on compound meteorological drought index (CI)[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(5): 1-8.
- [29] 刘泉杉, 吴宗俊, 崔宁博, 等. 云贵高原参考作物蒸散量时空特征及成因分析[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(3): 302-310.
LIU Q S, WU Z J, CUI N B, et al. Spatial-temporal distribution characteristics and attribution analysis of reference crop evapotranspiration in Yunnan-Kweichow Plateau[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(3): 302-310.
- [30] 张强, 邹旭恺, 陈鲜艳, 等. 考虑多尺度和蒸散影响的新干旱指数研究——以云南为例[J]. *高原气象*, 2022, 41(4): 909-920.
ZHANG Q, ZOU X K, CHEN X Y, et al. A new drought index study that takes into account a multi-timescale and the effects of evapotranspiration-taking Yunnan as an example [J]. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(4): 909-920.
- [31] 张翔, 陈能成, 胡楚丽, 等. 1983-2015 年我国农业区域三类骤旱时空分布特征分析[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(10): 1048-1057.
ZHANG X, CHEN N C, HU C L, et al. Spatio-temporal distribution of three kinds of flash droughts over agricultural land in China from 1983 to 2015 [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(10): 1048-1057.
- [32] 陈昌春, 张余庆, 王峻晔, 等. 骤发干旱研究进展与展望[J]. *南水北调与水利科技*, 2020, 18(1): 26-33.
CHEN C C, ZHANG Y Q, WANG J Y, et al. Flash drought: progress and prospect[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(1): 26-33.

(上接第 241 页)

- [9] 藤森岭. 微生物源农药杂草的防除[J]. *农药技术*, 1993, 48(1): 18-21.
TENG S L. Control of microbial pesticide weeds[J]. *Pesticide Technology*, 1993, 48(1): 18-21.
- [10] 冯化成. 新微生物源除草剂 Campelyco[J]. *世界农药*, 2001, 23(2): 53.
FENG H C. A new microbial herbicide Campelyco[J]. *World Pesticides*, 2001, 23(2): 53.
- [11] 曾秘, 张亚, 彭争科, 等. 微生物除草剂的研究现状[J]. *江西农业学报*, 2013, 25(2): 40-43, 46.
ZENG B, ZHANG Y, PENG Z K, et al. Research situation of microbial herbicides [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2013, 25(2): 40-43, 46.
- [12] 陶黎明. 微生物除草剂的研究与开发进展[C]//2012 中国国际农用化学品高峰论坛暨第四届农药科技与应用发展学术交流会议论文集. 上海: 中国国际贸易促进委员会, 世界农药编辑部, 2012: 24-27.
TAO L M. Progress in research and development of microbial herbicides[C]//Collection of Papers from the 2012 China International Agricultural Chemicals Summit Forum and the 4th Academic Exchange Conference on Pesticide Technology and Application Development. Shanghai: China Council for the Promotion of International Trade, World Pesticide Editorial Department, 2012: 24-27.
- [13] 马永强, 朱海霞. 具有除草活性的生防菌株 GD-9 发酵条件优化及菌剂制备[J]. *植物保护*, 2019, 45(3): 88-95.
MA Y Q, ZHU H X. Optimization of fermentation conditions and preparation of microbial inoculum for biocontrol strain GD-9 with herbicidal activity[J]. *Plant Protection*, 2019, 45(3): 88-95.
- [14] 李健, 李美, 高兴祥, 等. 微生物除草剂研究进展与展望[J]. *山东农业科学*, 2016, 48(10): 149-151, 156.
LI J, LI M, GAO X X, et al. Research status and prospect of microbial herbicides[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48(10): 149-151, 156.
- [15] 李新, 谢明, 谭万忠, 等. 杂草生防真菌的研究进展[J]. *中国生物防治*, 2009, 25(1): 83-88.
LI X, XIE M, TAN W Z, et al. Research progress on fungi as weed biological control agents [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2009, 25(1): 83-88.
- [16] AULD B A, MORIN L. Constraints in the development of bioherbicides[J]. *Weed Technology*, 1995, 9(3): 638-652.
- [17] ZHANG J L, ZHANG L H, LIU Y C, et al. The herbicidal activity of mutant isolates from *Botrytis cinerea*[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2006, 5(8): 622-628.
- [18] 韩川. 用于微生物除草剂的杂草病原真菌的筛选与评价[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
HAN C. The selection and evaluation of pathogenic fungi using for microbial herbicide [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [19] 朱海霞, 马永强, 魏有海, 等. 多孢木霉 HZ-31 菌株发酵条件研究[J]. *西北农业学报*, 2017, 26(1): 132-136.
ZHU H X, MA Y Q, WEI Y H, et al. Study on culture conditions of *Trichoderma polysporum* HZ-31 [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2017, 26(1): 132-136.
- [20] 吴龙月, 马水丽, 何小芳, 等. 红缘拟层孔菌菌丝的生物特性研究[J]. *中国食用菌*, 2022, 41(3): 30-34.
WU L Y, MA S L, HE X F, et al. Study on the mycelia biological characteristics of *fomitopsis pinicola* [J]. *Edible Fungi of China*, 2022, 41(3): 30-34.