

宋艳玲. 全球干旱指数研究进展. 应用气象学报, 2022, 33(5): 513-526.

DOI: 10.11898/1001-7313.20220501

# 全球干旱指数研究进展

宋艳玲<sup>1)2)</sup>\*

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

<sup>2)</sup>(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

## 摘 要

干旱是世界最严重的气象灾害,是自然灾害中经济损失最重、影响范围最广的灾害。我国深受干旱灾害的影响,近几十年干旱事件频繁发生,给社会造成的不利影响和对人们生存环境的危害日趋严重。因此,讨论全球干旱指数研究进展对于我国干旱研究及防旱抗旱工作具有重要意义。该文系统介绍全球特别是欧美等国气象干旱指数、农业干旱指数、水文干旱指数、遥感干旱指数以及综合干旱指数研究进展,并与我国干旱指数研究情况对比。探讨我国在干旱研究领域存在的主要问题,包括干旱指数适用性比较不足,新的机理性干旱监测指数研究不足,干旱预测预警研究不足。因此加强干旱机理机制研究、开展干旱监测准确性定量评估和加强数值模式在干旱预测预警中的应用是未来研究的重点和难点。

**关键词:** 干旱指数; 农业; 定量评估; 预测预警

## 引 言

干旱是世界最严重的气象灾害,它可以发生在世界各地任何气候条件下,甚至是沙漠和雨林。干旱是自然灾害中经济损失最重、影响范围最广的灾害,影响社会经济和人民生活。长历时大范围干旱可能影响农业、粮食安全、水利发电以及工业、人类和动物健康等。这种影响取决于干旱发生时的社会经济背景和暴露体的脆弱性。全世界每年因干旱造成的经济损失高达 60~80 亿美元,超过其他气象灾害所带来的经济损失<sup>[1]</sup>。在自然灾害损失中,气象灾害约占自然灾害的 70%,其中干旱灾害损失占气象灾害损失的 50%<sup>[2]</sup>。中国深受干旱影响,近几十年我国干旱事件频繁发生,再加上经济迅速发展、人口增长等原因,干旱给社会造成的不利影响和对人们生存环境的危害日趋严重。我国北方地区继 1997 年发生大范围干旱后,1999—2002 年又连续 4 年少雨干旱,2000 年我国受旱面积高达  $4.045 \times$

$10^7$  hm<sup>2</sup>,为 1949 年以来之最。2006 年夏季,重庆发生百年一遇特大伏旱,四川遭遇近 50 年最严重干旱<sup>[3]</sup>。

由于干旱形成的复杂性及其影响的深远性,准确定量监测干旱的开始及结束、持续时间、覆盖范围、强度以及影响评估十分困难。对于不同类型干旱,如气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱等,决定干旱开始和结束的标准差异很大。另外,全球大部分地区缺乏土壤干湿状况的历史记录,如土壤水分观测,而这是度量干旱最客观的要素。因此为了监测和研究干旱及其变化,全球科学家利用较容易获得的气温、降水量等要素,发展了多种干旱指数。1965 年美国 Palmer 利用降水和气温数据发展了干旱指数(Palmer drought severity index, PD-SI)<sup>[4]</sup>,至今该指数仍在世界范围内广泛使用。1993 年美国 McKee 等研发了标准降水指数(standardized precipitation index, SPI)<sup>[5]</sup>,2009 年世界气象组织(WMO)向全球其他国家推荐使用该指数<sup>[6]</sup>。目前,该干旱指数在全球范围内广泛使用。2010 年西

2022-07-04 收到, 2022-07-29 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划(2019YFD1002204, 2018YFA0606103), 中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J051)

\* 邮箱: songyl@cma.gov.cn

班牙 Vicente-Serrano 等研发了标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)<sup>[7]</sup>, 该指数不仅考虑降水对干旱的影响, 还考虑蒸发对干旱的影响。2012 年意大利 Sepulcre-Canto 等研发了综合干旱指数 (combined drought indicator, CDD)<sup>[8]</sup>。

本文综述全球最主要的干旱指数, 尤其是近十几年的新干旱研究成果, 有助于加深对干旱的认识和理解, 同时也为今后开展干旱研究工作指明方向。

## 1 全球干旱指数研究进展

全球干旱指数可以分为气象干旱指数、农业干旱指数、水文干旱指数、遥感干旱指数和综合干旱指数。本文针对这几类干旱指数的发展和各国应用情况进行分析。

### 1.1 气象干旱指数

#### 1.1.1 标准降水指数

1993 年美国 McKee 等研发了标准降水指数 (standardized precipitation index, SPI)<sup>[5]</sup>, 2009 年世界气象组织 (WMO) 向全球其他国家推荐使用该指数<sup>[6]</sup>。SPI 的计算需要使用历史降水序列, 如果降水序列足够长, 在计算 SPI 过程中包括了极端干旱和极端湿润样本, SPI 对干旱的监测会更接近实际情况, 一般情况下要求降水序列为 30 年<sup>[9-10]</sup>。干旱事件根据 SPI 计算结果进行判断, 当 SPI 结果连续小于 -0.5 时, 判断为干旱事件开始; 当 SPI 大于 -0.5 时, 干旱事件结束。计算 SPI 时仅需输入降水数据, 降水数据可以是日降水量、周降水量, 也可以是月降水量。

根据干旱实际情况, SPI 可用于计算任何时间尺度。用于干旱情况监测, SPI 采用 3 个月时间尺度即可满足要求。监测干旱对农业的影响, 国际上一般采用的时间尺度为 6 个月。监测干旱对水文的影响, 国际上一般采用 12 个月或更长时间尺度。SPI 的最大优势是仅用降水数据即可计算, 且等级标准适用于不同时间尺度, SPI 可以在任何气候区使用。SPI 的缺点是未考虑气温在干旱中的作用。目前美国、巴西、加拿大、中国、德国、新西兰、西班牙、泰国、土耳其等国均使用该指数进行干旱监测。

#### 1.1.2 标准加权降水指数

2009 年 Lu 等在 SPI 指数的基础上, 进一步考虑前期降水对干旱指数影响的衰减作用, 提出了改

进的标准加权降水指数 (standardized weighted average of precipitation, SWAP)<sup>[11]</sup>, 使其更加客观合理。SWAP 干旱指数在 SPI 的基础上, 引入 WAP (the weighted average of precipitation) 指数。该指数考虑了径流、蒸散、渗透等因素的干旱程度衰减项, 贡献参数越大说明前期的降水贡献越大。对 WAP 指数进行标准化处理得到 SWAP<sup>[11-13]</sup>。由于考虑了前期降水的衰减系数, 因此理论上 SWAP 更加合理, 对干旱的监测更接近实际干旱情况, SWAP 可以对干旱进行逐日监测, 对干旱开始和结束时间监测更及时。

#### 1.1.3 标准化降水蒸散指数

2010 年西班牙 Vicente-Serrano 等研发了标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)<sup>[7]</sup>。SPEI 通过计算蒸发考虑了气温在干旱中的作用。SPEI 不仅可以监测干旱事件, 还可以监测洪涝事件。在计算过程中使用的降水序列越长, 包含历史干旱样本越多, 干旱监测结果越接近实际情况。计算 SPEI 需要使用月平均气温和月降水量, 且要求数据序列完整, 数据无缺失。SPEI 能够监测和识别干旱对农业、水文等行业影响。

SPEI 的优点是在计算干旱指数过程中既考虑降水的作用, 又考虑气温的作用。由于 SPEI 是标准化指数, 可以在任何气候区使用。SPEI 的缺点是在计算 SPEI 过程中要求气温和降水数据序列完整, 在数据序列不完整地区会限制该指数使用。此外, 由于该指数输入数据为月平均气温和月降水量, 导致干旱开始时间和结束时间的监测滞后。由于考虑了气温在干旱中的作用, SPEI 适用于开展气候变化背景下干旱变化的研究。

#### 1.1.4 帕默尔干旱强度指数

1965 年美国 Palmer 利用降水和气温数据发展了帕默尔干旱强度指数 (Palmer drought severity index, PDSI)<sup>[4]</sup>。该指数利用降水和气温计算水分平衡识别干旱, 在计算干旱指数过程中使用月平均气温和月降水量, 考虑了气温对蒸发的影响。该指数可以识别干旱对农业的影响, 也可以识别干旱对其他行业的影响。PDSI 是依据土壤水分平衡原理建立的指标, 物理意义清晰, 不仅考虑了降水在干旱中的作用, 还考虑了气温在干旱中的作用, 使得干旱监测更具有理论意义, 监测结果更接近实际情况。但该指数输入变量为月尺度气温和降水, 对干旱开

始和结束时间的监测相对滞后<sup>[14]</sup>。目前美国、巴西、加拿大、土耳其等国采用该指数进行干旱监测。

### 1.1.5 常年降水百分比指数

2006年 Hayes 研发了常年降水百分比指数(percent of normal precipitation, PNP)<sup>[15]</sup>, 该指数可以用于任何地点任何时间段, 计算的时间尺度可以是日尺度、月尺度, 也可以是季节尺度和年尺度, 利用当前降水与常年降水对比。常年值要求至少30年, 该指数可以监测干旱影响。该指数的优点是计算简便快捷, 缺点是不同时间尺度、不同区域不能用同一等级标准进行比较, 另外有时降水量不服从正态分布, 使得等级划分标准不合理。不同气候区之间特别是干旱区和湿润区之间难以进行对比分析。

### 1.1.6 加权异常标准化降水指数

2004年 Lyon 提出了加权异常标准化降水指数(weighted anomaly standardized precipitation index, WASP)<sup>[16]</sup>, 该指数仅考虑降水偏少引发干旱, 输入的气象数据是分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的月降水格点数据, 由于输入变量仅为降水, 计算简便。该指数适用于监测热带地区的干旱, 考虑湿润时段和少雨时段, 可以监测干旱对农业及其他行业的影响。该指数的缺点是不适用于常年干旱地区, 此外有些地区获得格点数据困难。

### 1.1.7 干旱识别指数

2005年希腊 Tsakiris 等研发了干旱识别指数(drought reconnaissance index, DRI)<sup>[17]</sup>, 该指数构建机理为利用降水量和潜在蒸散量, 计算水分平衡。需要输入的气候要素为月平均气温和月降水量, 输出有 DRI 和标准化 DRI, 标准化 DRI 与 SPI 类似, 但更具有代表性。该指数可以用于监测干旱对农业和水文的影响。该指数的优点是通过计算潜在蒸发计算水分平衡, 比 SPI 更具有理论意义。但该指数由于使用月尺度气温和降水, 对干旱开始时间和结束时间的监测滞后。

## 1.2 农业干旱指数

### 1.2.1 作物水分指数

1968年 Palmer 研发了作物水分指数(crop moisture index, CMI)<sup>[18]</sup>, CMI 利用周平均气温和周降水量, 基于 PDSI 的输出参数计算潜在蒸发和湿润度, 识别水分匮乏, 反映干旱对农作物的影响。CMI 克服了 PDSI 的缺陷, 可以快速识别干旱。该指数的优点是可以快速识别干旱的发生和结束, 并

且可以对比不同气候区的干旱。美国和巴西使用该指数进行作物干旱监测。

### 1.2.2 作物特定干旱指数

1993年 Meyer 等研发了作物特定干旱指数(crop-specific drought index, CSDI)<sup>[19]</sup>, 该指数可以计算干旱对作物单产的影响。该指数通过计算土壤水分平衡识别干旱的影响, 并且只有当干旱胁迫影响了作物生长和产量时干旱才被识别。而 PDSI 和 CMI 识别干旱时, 作物产量不一定受到影响。计算 CSDI 需要输入的气象变量包括日最高气温、日最低气温、降水量、露点温度、风速和太阳辐射, 还需要输入土壤参数和作物参数。该指数的优点是可以评估干旱对作物产量的影响, 缺点是计算所需数据复杂, 有些地区不具备这些数据。该指数在美国地区用于识别干旱对产量的影响<sup>[20]</sup>。

### 1.2.3 农业干旱参考指数

2012年 Woli 等研发了农业干旱参考指数(agricultural reference index for drought, ARID)<sup>[21]</sup>, 该指数利用日平均气温和日降水量、以及水分平衡方程和作物模型 CERES-Maize 计算水分胁迫, 识别干旱对作物生长和产量的影响, 该指数也可以预测土壤湿度状况。该指数的优点是利用作物模型和水分平衡方程预测土壤水分和作物遭受水分胁迫情况, 机理性强, 缺点是不易大面积推广使用。瑞士使用该指数进行干旱对农业影响监测。

### 1.2.4 土壤水分异常指数

1988年 Bergman 等研发了土壤水分异常指数(soil moisture anomaly, SMA)<sup>[22]</sup>, 该指数利用周平均或月平均气温和周、月降水量以及土壤参数, 以及水分平衡方程计算潜在蒸发和土壤水分含量, 识别干旱的发生和干旱程度。该指数用于监测干旱对农作物影响。该指数的优点是同时考虑气温和降水影响, 可以计算不同深度土壤湿度, 缺点是计算复杂, 不利于大范围推广。

### 1.2.5 土壤水分亏缺指数

2005年 Narasimhan 等研发了土壤水分亏缺指数(soil moisture deficit index, SMDI)<sup>[23]</sup>, 该指数利用水文模型 SWAT 模拟4个深度土层的土壤湿度(土壤表层, 0.61 m, 1.23 m 和 1.83 m 深度)状况反映干旱情况。该指数的优点是通过计算不同作物根系深度的土壤湿度识别不同作物干旱, 缺点是需要利用水文模型 SWAT 输出值, 计算复杂, 不利于大范围使用。

### 1.2.6 蒸散亏缺指数

2005年Narasimhan等研发了蒸散亏缺指数(evapotranspiration deficit index, ETDI)<sup>[23]</sup>,该指数利用SMDI计算水分胁迫系数,并与实际蒸发对比识别作物水分亏缺。该指数利用水文模型SWAT计算作物根系土壤湿度识别干旱对作物影响。该指数的优点是可以计算实际蒸发和潜在蒸发识别干旱和湿润阶段,缺点是利用水文模型SWAT输出参数,不利于计算。

### 1.2.7 土壤含水量指数

2015年在英国农业会议上提出土壤含水量指数(soil water storage, SWS)<sup>[24]</sup>,该指数可以识别作物根层土壤含水量,考虑了降水和灌溉的影响,该指数的计算受到作物类型和土壤类型影响。计算需要输入的变量为作物根层深度和土壤类型参数等。该指数的优点是可以计算不同土壤类型和不同作物干旱,缺点是计算复杂,不利于大范围使用。

## 1.3 水文干旱指数

### 1.3.1 陆面水供给指数

1982年Shafer等发展了陆面水供给指数(surface water supply index, SWSI)<sup>[25]</sup>,该指数考虑Palmer在PDSI中的计算方法,增加供水数据(积雪、融雪、径流以及储水信息),SWSI中轻度干旱发生率为26%~50%,中度干旱发生率为14%~26%,重度干旱发生率为2%~14%,极端干旱发生率为低于2%。该指数输入参数为降水、径流、贮水信息等。该指数的优点是充分考虑了水源,缺点是输入数据复杂,不利于比较<sup>[26-27]</sup>。美国使用该指数。

### 1.3.2 标准化水深指数

2004年Bhuiyan发展了标准化水深指数(standardized water-level index, SWI)<sup>[28]</sup>,该指数利用地下水深度监测干旱对地下水补给的影响。该指数计算需要输入的数据为地下水深度,适用于主要河流和溪流季节性低流量频繁的区域。该指数的优点是可以监测干旱对地表水和地下水影响,缺点是研究地点有时缺乏代表性。

### 1.3.3 综合干旱指数

2004年Keyantash等研发了综合干旱指数(aggregate dryness index, ADI)<sup>[29]</sup>,该干旱指数利用降水、蒸散、径流、水库蓄水、积雪、土壤含水量等信息,考虑多时间尺度所有水资源,计算水资源亏缺情况。该指数可用于多种类型的干旱影响研究。研究各种气候状况下总水量可以更好地了解水的使用

情况和水亏缺情况。该指数的优点是考虑多种地表水源以及大气降水,缺点是未考虑地下水的影响。

### 1.3.4 径流干旱指数

2008年Nalbantis研发了径流干旱指数(stream-flow drought index, SDI)<sup>[30]</sup>,该指数使用月径流值和与SPI相似的标准化方法,可以识别干旱期和湿润期。该指数计算需要输入的数据为月平均径流和历史径流序列,用特定标准监测和识别干旱事件。该指数的优点为易于使用,并且数据可以缺失,样本记录越长,结果越接近实际情况,缺点是考虑要素单一。

### 1.3.5 标准径流指数

2012年Telesca等研发了标准径流指数(standardized streamflow index, SSFI)<sup>[31]</sup>,该指数利用月平均径流数据和标准化方法,月径流数据可以是观测数据也可以是预测数据。该指数可以监测多时间尺度的水文条件,特别是可以提供干旱和洪涝的强度以及时段。该指数的优点是输入变量单一,易于计算,且输入数据序列可以缺失,缺点是仅能监测跟干旱和洪涝相关的径流,不能反映对其他行业的影响<sup>[32]</sup>。

### 1.3.6 标准化融雪和降水指数

2014年Staudinger等研发了标准化融雪和降水指数(standardized snowmelt and rain index, SMRI)<sup>[33]</sup>,该指数考虑积冰和融雪对径流的影响,采用的标准化方法与SPI类似。该指数计算需要输入的数据为径流、逐日降水、逐日气温。该指数的优点是可以使用气温和降水模拟降雪,而不使用观测降雪量,可以计算未来降雨和积雪对径流的影响,缺点是不使用观测雪深和相关的融雪当量可能会导致径流预测错误。

### 1.3.7 标准化蓄水供应指数

2015年Gusyev等研发了标准化蓄水供应指数(standardized reservoir supply index, SRSI)<sup>[34]</sup>,用于分析干旱时期蓄水数据。该指数通过分析蓄水数据概率分布,为某一地区极端干旱和极端湿润时期的用水供应提供信息。该指数计算需要输入的数据为月蓄水流入和平均蓄水量。该指数的优点是利用概率分布方程易于计算,缺点是未考虑水库管理引起的蓄水变化和蒸发造成的损失。

## 1.4 遥感干旱指数

### 1.4.1 归一化植被指数

1984年Tarpley等研发了归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)<sup>[35]</sup>,该指数

使用全球植被指数数据,在可见光和近红外通道中测量的辐射值用于计算 NDVI。该指数监测 7 d 内植被的绿色值,识别与干旱有关的植被状况,可以用于监测干旱对农业的影响。该指数计算需要输入的数据为 NOAA 卫星数据,其优点是利用卫星数据监测与干旱事件相关的植被健康状况,具有非常高的分辨率和大的空间覆盖度,缺点是卫星数据缺乏长序列且对比性差<sup>[36]</sup>。

#### 1.4.2 土壤矫正的植被指数

1988 年 Huete 研发了土壤矫正的植被指数(soil adjusted vegetation index, SAVI)<sup>[37]</sup>,该指数利用卫星数据和全球模式数据监测土壤和植被指数,利用土壤归一化数据矫正植被指数。该指数需要输入的数据为卫星和全球模式产品。该指数优点是高精度高密度遥感数据能开展大范围干旱监测,缺点是计算复杂且数据序列短。

#### 1.4.3 植被健康指数

1990 年 Kodan 研发了植被健康指数(vegetation health index, VHI)<sup>[38]</sup>,该指数利用 NOAA 卫星可见光、红外和近红外多光谱通道的扫描辐射仪(AVHRR)的遥感数据监测和识别干旱对农业影响。该指数输入数据为 NOAA 卫星数据,该指数优点是高精度覆盖全球,缺点是卫星数据序列短且对比性差<sup>[39-40]</sup>。

#### 1.4.4 温度条件指数

1995 年 Kogan 研发了温度条件指数(temperature condition index, TCI)<sup>[41]</sup>,该指数利用 NOAA 卫星多光谱通道的扫描辐射仪(AVHRR)的光谱带,估算最高气温和最低气温,并且与 NDVI 结合使用,评估干旱对植被的影响。该指数的优点是高精度和空间大尺度,缺点是数据序列短且云遮盖可能引起误差。

#### 1.4.5 植被状况指数

1995 年 Kogan 研发了植被状况指数(vegetation condition index, VCI)<sup>[41]</sup>,该指数利用 NOAA 卫星多光谱通道的扫描辐射仪(AVHRR)的波段识别干旱情况,通过植被变化并与历史值比较,以及利用 NDVI 和 TCI 数据识别干旱的发生、干旱持续时间和严重程度<sup>[42]</sup>。该指数计算需要输入的数据为 NOAA 卫星数据,优点是时间上高精度和空间上大尺度,缺点是数据序列短并受云遮盖影响。

#### 1.4.6 归一化植被冠层含水量指数

1996 年 Gao 研发了归一化植被冠层含水量指

数(normalized difference water index, NDWI)<sup>[43]</sup>,该指数与 NDVI 方法非常相似,使用近红外光谱监测植被冠层的含水量,利用植被冠层含水量的变化识别干旱胁迫<sup>[44]</sup>。该指数计算需要输入的数据为近红外光谱卫星数据,优点是高分辨率和大空间尺度,缺点是卫星数据序列短可比性差,植被冠层水分胁迫也可能是其他因素引起的。

#### 1.4.7 增强的植被指数

2002 年 Huete 等研发了增强的植被指数(enhanced vegetation index, EVI)<sup>[45]</sup>,该指数输入数据为 MODIS 卫星数据,利用 MODIS 平台监测干旱对植被冠层的影响,植被指数 EVI 对植被冠层监测更敏感。该指数的优点是高分辨率和所有地形的空间覆盖,缺点是植物冠层的胁迫可能是由干旱以外因素影响引起的,仅使用 EVI 很难识别。

#### 1.4.8 需水满足指数

2002 年 Verdin 等研发了需水满足指数(water requirement satisfaction index, WRSI)<sup>[46]</sup>,该指数基于作物的可用水量监测作物在生长季节的长势,为实际蒸散量与潜在蒸散量的比率,这种比率是作物特有的,该指数反映干旱对作物发育和产量的胁迫。该指数计算需要输入的数据为作物发育模型输出量、作物系数和卫星产品。该指数优点是数据高分辨率,缺点是基于卫星的降雨量估算存在一定误差,这将影响所用作物模型的结果和蒸散平衡。

#### 1.4.9 植被干旱响应指数

2008 年 Brown 等研发了植被干旱响应指数(vegetation drought response index, VDRI)<sup>[47]</sup>,该指数利用卫星遥感、气候指标以及其他生物物理信息和土地利用信息来监测干旱引起的植被胁迫。该指数计算需要输入的数据为 SPI, PDSI, 年度植被绿度、季节信息、土地覆盖、土壤有效水容量、灌溉农业和生态区信息。该指数的优点是使用多源数据,包括利用地表和遥感数据以及数据挖掘技术,缺点是遥感数据序列短。加拿大使用该指数进行干旱监测。

#### 1.4.10 蒸发胁迫指数

2011 年 Anderson 等研发了蒸发胁迫指数(evaporative stress index, ESI)<sup>[48]</sup>,该指数利用地球静止卫星数据将蒸发作用与潜在蒸腾作用进行比较,该指数计算需要输入的数据为遥感潜在蒸散量,优点是具有高精度和空间覆盖任何地区,缺点是云覆盖和数据序列短。

## 1.5 综合干旱监测方法和指数

### 1.5.1 美国干旱监测系统

2002年 Svoboda 等研发了美国干旱监测系统(United States drought monitor, USDM)<sup>[49]</sup>,该系统将干旱分为5个等级,从每3~5年发生1次的异常干旱,到每50年发生1次的异常干旱,使用百分位排序方法,对不同干旱指数和指标进行比较。该系统的输入为各种干旱指数、土壤湿度、水文数据、气候数据、模式模拟和遥感数据等。该系统优点是使用多种指数和指标,从而使最终干旱结果更加可靠。缺点是如果输入变量较少,结果的可靠性将会减弱。

### 1.5.2 全球陆面数据同化系统

2004年 Rodell 等研发了全球陆面同化系统(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)<sup>[50]</sup>,该系统使用陆面和遥感数据以及陆面模式和数据同化技术,提供有关陆面条件的数据,输出结果中的土壤水分数据作为干旱指标。该系统的输入为陆面模式数据、地面气象观测数据、植被分类数据和卫星数据。由于该系统是全球性的且分辨率高,有助于监测数据贫乏地区的干旱<sup>[51-52]</sup>,缺点是对于资料缺乏的海岛国等地区,该指数精度不足。

### 1.5.3 全球综合干旱监测和预测系统

2014年 Hao 等研发了全球综合干旱监测和预测系统(Global Integrated Drought Monitoring and Prediction System, GIDMPS)<sup>[53]</sup>,该系统利用干旱指数 SPI 和 SMDI 以及土壤湿度数据,也使用遥感数据和数据同化技术,生成格点的干旱监测、预测和评估产品。该系统需要输入的参数为遥感数据和 GLDAS 的数据。该系统的优点是格点化和全球化数据覆盖所有区域且易于计算,缺点是输出数据数据序列较短。

### 1.5.4 综合干旱指数

2012年 Sepulcre-Canto 等研发了综合干旱指数(combined drought indicator, CDI)<sup>[8]</sup>,该指数由 SPI、土壤水分和遥感植被指数组成。当出现降水不足时,显示干旱监测关注;当降水不足转化为土壤水分不足时,达到预警级别;当降水和土壤水分不足转化为对植被的影响时,预警级别提高。SPI 由台站降水数据计算,土壤水分数据由 LISFLOOD 模式提供。该指数优点为遥感和地面数据结合,空间覆盖好,分辨率高,缺点是 SPI 有时不能监测到所有的干旱情况,目前该指数仅在欧洲使用。

### 1.5.5 多变量标准化干旱指数

2013年 Hao 等研发了多变量标准化干旱指数(multivariate standardized drought index, MS-DI)<sup>[54]</sup>,该指数利用降水和土壤水分亏缺识别干旱,输入参数为月降水和土壤湿度数据,土壤湿度来源于陆面分析系统,为格点数据。该指数的优点是网格化全球数据覆盖所有区域且易于使用,缺点是该系统输出数据序列较短。

## 2 中国干旱指数研究进展

我国干旱频发,严重影响农业生产和人民生活。我国学者针对干旱问题进行了大量研究,开展了国内外干旱指数在中国各地区的适用性研究<sup>[55-67]</sup>,同时针对我国干旱时空演变特征及干旱风险变化也开展了大量研究<sup>[68-89]</sup>,提出新的干旱指数或改进原有的国际上通用的干旱指数<sup>[90-102]</sup>,特别是提出了一系列新的关于干旱指数的行业标准或国家标准,指导全国或地方防旱抗旱工作,这些行业标准或国家标准包括气象干旱指数<sup>[103-104]</sup>、水文干旱指数<sup>[105-106]</sup>、农业干旱指数<sup>[107-117]</sup>,其中文献<sup>[103]</sup>的气象干旱指数和文献<sup>[113]</sup>的作物水分亏缺距平指数被广泛使用。

### 2.1 气象干旱指数

2017年张存杰等研发了气象干旱指数(meteorological drought composite index, MCI)<sup>[103]</sup>,该指数是干旱综合指数,考虑了不同时间尺度的干旱,由近30d相对湿度指数、近60d标准化权重降水指数、近90d标准化降水指数和近150d标准化降水指数构成,该指数还考虑了季节调节系数。MCI解决了其他气象干旱指数对降水过程反应过于灵敏、干旱发展过程出现不合理的跳跃问题,也解决了对重大干旱过程反应偏轻的问题。MCI在权重系数中考虑了区域差异和季节影响,有一定的适用性,缺点是虽然为气象干旱指数,但监测到的干旱不一定对农业或水文等产生影响。该指数目前是中国气象局干旱监测服务中广泛使用的气象干旱指数。

### 2.2 作物水分亏缺距平指数

2015年吕厚荃等研发了作物水分亏缺距平指数(crop water deficit index, CWDI)<sup>[113]</sup>,该指数是农业干旱指数,由于在不同季节和不同气候区域作物种类不同、蒸散差别较大,难于以统一的标准表达各区域水分亏缺程度,该指数选用作物水分亏缺距

平指数消除区域和季节差异。该指数目前是中国气象局业务服务中广泛使用的农业干旱监测指数。该指数由某10 d的累积降水量、某10 d灌溉量和作物某10 d的潜在蒸散量构成。

### 3 存在的问题

干旱是气象灾害中最严重的灾害,大范围长时间干旱严重影响农业生产和人们正常生活。干旱监测作为主要信息源直接影响国家防旱抗旱战略部署,因此准确识别干旱的范围和开始结束时间关系防旱抗旱措施的选取,关系粮食稳产丰产。目前我国干旱指数研究存在下列问题。

#### 3.1 现有干旱指数在不同地区不同干旱机制下适用性研究不足

我国幅员辽阔,各地区分属不同气候区,主要气候类型包括热带季风气候、亚热带季风气候、温带季风气候、高原山地气候和温带大陆性气候,各地造成干旱形成机制和影响不同。如华北地区属于温带季风气候,年降水量约为600 mm,主要种植大田作物,一般降水偏少持续1个月就会发生干旱;西南地区属于亚热带季风气候,年降水量为2000 mm,种植的农作物一般为水稻,是灌溉农业,只有降水持续偏少2~3个月以上,才会影响江河蓄水,进而发生干旱,影响水稻灌溉和人口饮水。可见各地区干旱形成机制及影响不同,但目前的研究仅限于个别干旱指数在个别地区的适用性研究,主要气候区各种干旱指数适用性比较研究匮乏,且缺乏用于比较的客观统一标准。如华北地区经常发生干旱,但干旱指数在华北地区适用性如何,哪个指数最适合在华北地区使用等相关研究不足。只有针对不同地区不同干旱机制对各个干旱指数的适用性进行系统性比较,选出最适合的干旱指数,并对干旱指数的缺点和不足进行长期深入研究和改进,才能提高干旱监测水平。

#### 3.2 新的机理性干旱监测指数研究不足

20世纪60—90年代欧美等发达国家干旱指数研究主要聚焦于气象干旱指数,2000年以来遥感干旱指数、机理性农业干旱指数、机理性水文干旱指数以及同化数据和格点数据使用研究取得一定进展。我国学者虽然针对干旱问题也进行了大量研究,但利用现有干旱指数研究干旱时空演变规律较多,针对干旱指数的改进也主要聚焦于目前国际上比较成熟的

干旱指数。我国自主研发的机理性干旱指数较少,基于降水、植被、径流、土壤等多种因素全过程的干旱机理机制研究匮乏。我国各地干旱机制复杂,应根据我国干旱的实际情况,开展机理性干旱指数核心技术研发,并积极向干旱监测业务转化,为国家防旱抗旱提供更准确的信息。

#### 3.3 干旱预测预警研究不足

我国科技工作者针对干旱监测开展了大量研究,但干旱预测预警研究不足。在实际农业生产中,干旱预测预警在防旱抗旱工作中非常重要,特别是提前1个月干旱预测预警,政府部门将有充足的时间采取农业防旱抗旱措施,提早3~5 d干旱预测预警虽然也有助于农业防旱抗旱,但抗旱效果不如前者。提早1个月干旱预测预警技术手段一般依靠数值模式,不同模式对干旱预报预测能力不同,同一气候模式对不同地区干旱预报预测能力也不相同。因此加强数值模式对不同地区不同时间尺度干旱预报预测能力研究,开展10 d以上,特别是提前1个月干旱预测预警研究对于农业防旱抗旱非常重要。

### 4 未来研究重点和难点

#### 4.1 加强干旱机理机制研究

干旱的程度和范围与大气降水量和频次、土壤物理性质、地表水量、地下水以及地表作物类型和生长阶段等过程密切相关,这些是高度非线性过程。现有干旱指数大多为与大气降水相关的气象干旱指数或与作物需水和蒸散相关的农业干旱指数,这些干旱指数将一个完整的自然水循环过程割裂开,特别是开展大气降水后由土壤物理性质决定的水分渗透机制和土壤水分平衡研究较少,对地表水和地下水研究也较少,不能全面揭示干旱过程的内在机制。因此需要加强降水、植被、径流、土壤等多种因素在干旱发生发展过程中的作用机制研究,构建基于自然水循环全过程的新的干旱指数。

#### 4.2 开展系统的干旱监测准确性定量评估

虽然我国科技工作者针对干旱指数在不同地区的适用性开展了一定研究,但鉴于干旱的特殊性,干旱监测准确性定量评估较少,也缺乏干旱监测准确性评估标准。因此应开展干旱监测准确性评估标准研究,开展不同干旱指数在不同地区干旱监测准确性定量评估研究,特别是针对历史上长时间大范围典型干旱个例,各干旱指数的监测准确性要开展定

量评估。只有开展干旱监测准确性定量系统评估,才能发现各干旱指数监测能力的不足,选出最适合某一地区的干旱指数,并根据该指数的不足开展干旱指数的改进工作,推进干旱监测能力的提高。

#### 4.3 加强数值模式在干旱预测预警中的应用

干旱范围、程度和趋势预测对于国家防灾减灾措施选取具有重要意义,特别是在时间尺度上提前1个月以上提供干旱预测预警信息能为国家防灾减灾措施选取提供足够的时间。由于重大干旱事件的形成均有降水长期偏少的累积效应,因此将前期的干旱监测与数值模式预报的未来天气气候相结合,实现干旱预测预警以及干旱灾害风险预估。因此,应开展数值模式在不同地区干旱事件的模拟能力研究,加强数值模式在干旱预测预警中的应用,加强不同地区长时间大范围干旱事件发生发展的天气气候成因模拟研究,以及长时间大范围干旱事件发生后地面植被变化对气候互馈机制模拟研究。此外,基于数值模式产品构建新的干旱预测预警指数也非常重要。

#### 参考文献

- [1] Wilhite D A. Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. *Drought: A Global Assessment*. London & New York: Routledge, 2000; 3-18.
- [2] 刘颖秋. 干旱灾害对我国社会经济的影响研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.  
Liu Y Q. The Study of Drought on Socioeconomic in China. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2005.
- [3] 张强, 潘学标, 马柱国, 等. 干旱. 北京: 气象出版社, 2009.  
Zhang Q, Pan X B, Ma Z G, et al. *Drought*. Beijing: China Meteorological Press, 2009.
- [4] Palmer W C. *Meteorological Drought*. Research Paper No. 45, US Weather Bureau, Washington, DC, 1965.
- [5] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. The 8th Conference on Applied Climatology, 1993.
- [6] Hayes M, Svoboda M, Wall N, et al. The Lincoln declaration on drought indices: Universal meteorological drought index recommended. *Bull Amer Meteor Soc*, 2011, 92(4): 485-488.
- [7] Vicente-Serrano S M, Begueria S, Lopez-Moreno J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J Climate*, 2010, 23: 1696-1718.
- [8] Sepulcre-Canto G, Horion S, Singleton A, et al. Development of a combined drought indicator to detect agricultural drought in Europe. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 2012, 12: 3519-3531.
- [9] Guttman N B. Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34: 113-121.
- [10] Guttman N B. Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 1999, 35: 311-322.
- [11] Lu E. Determining the start, duration, and strength of flood and drought with daily precipitation; Rationale. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L12707.
- [12] 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. GB/T20481—2006 气象干旱等级. 北京: 中国标准出版社, 2006.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. GB/T20481—2006 Meteorological Drought Grade. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [13] 宋艳玲, 王建林, 田靳峰, 等. 气象干旱指数在东北春玉米干旱监测中的改进. *应用气象学报*, 2019, 30(1): 25-34.  
Song Y L, Wang J L, Tian J F, et al. The spring maize drought index in Northeast China based on meteorological drought index. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(1): 25-34.
- [14] Alley W M. The Palmer drought severity index: Limitations and assumptions. *J Appl Meteor*, 1984, 23: 1100-1109.
- [15] Hayes M J. Drought Indices. Van Nostrand's Scientific Encyclopedia, John Wiley & Sons, Inc. DOI: 10. 1002/0471743984.vse8593.
- [16] Lyon B. The strength of El Niño and the spatial extent of tropical drought. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L21204. DOI: 10. 1029/2004GL020901.
- [17] Tsakiris G, Vangelis H. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 2005, 9/10: 3-11.
- [18] Palmer W C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The crop moisture index. *Weatherwise*, 1968, 21: 156-161.
- [19] Meyer S J, Hubbard K G, Wilhite D A. A crop-specific drought index for corn. I. Model development and validation. *Agronomy Journal*, 1993, 85: 388-395.
- [20] Meyer S J, Hubbard K G, Wilhite D A. A crop-specific drought index for corn. II. Application in drought monitoring and assessment. *Agronomy Journal*, 1993, 85: 396-399.
- [21] Woli P, Jones J W, Ingram K T. Agricultural reference index for drought (ARID). *Agronomy Journal*, 2012, 104: 287-300.
- [22] Bergman K H, Sabol P, Miskus D. Experimental Indices for Monitoring Global Drought Conditions. 13th Annual Climate Diagnostics Workshop, 1988.
- [23] Narasimhan B, Srinivasan R. Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration def-

- icit index(ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agric For Meteorol*, 2005, 133(1): 69-88.
- [24] British Columbia Ministry of Agriculture. Soil Water Storage Capacity and Available Soil Moisture. Water Conservation Fact Sheet, 2015.
- [25] Shafer B A, Dezman L E. Development of a Surface Water Supply Index(SWSI) to Assess the Severity of Drought Conditions in Snowpack Runoff Areas // Proceedings of the Western Snow Conference, Colorado State University, Fort Collins, CO, 1982; 164-175.
- [26] Doesken N J, Garen D. Drought Monitoring in the Western United States using a Surface Water Supply Index // Preprints, Seventh Conference on Applied Climatology, Salt Lake City, UT. American Meteorology Society, 1991; 266-269.
- [27] Doesken N J, McKee T B, Kleist J. Development of a Surface Water Supply Index for the Western United States. Climatology Report, 1991.
- [28] Bhuiyan C. Various Drought Indices for Monitoring Drought Condition in Aravalli Terrain of India. The XXth ISPRS Conference, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, Turkey, 2004.
- [29] Keyantash J A, Dracup J A. An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resources Research*, 2004, 40: W09304. DOI: 10. 1029/2003WR002610.
- [30] Nalbantis I, Tsakiris G. Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 2008, 23(5): 881-897.
- [31] Telesca L, Lovallo M, Lopez-Moreno I, et al. Investigation of scaling properties in monthly streamflow and standardized streamflow index time series in the Ebro Basin (Spain). *Physica A (Statistical Mechanics and its Applications)*, 2012, 391(4): 1662-1678.
- [32] Modarres R. Streamflow drought time series forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2007, 21: 223-233.
- [33] Staudinger M, Stahl K, Seibert J. A drought index accounting for snow. *Water Resour Res*, 2014, 50: 7861-7872.
- [34] Gusyev M A, Hasegawa A, Magome J, et al. Drought Assessment in the Pampanga River Basin, the Philippines. Part 1: A Role of Dam Infrastructure in Historical Droughts. The 21st International Congress on Modelling and Simulation(MODSIM 2015), 2015.
- [35] Tarpley J D, Schneider S R, Money R L. Global vegetation indices from the NOAA-7 meteorological satellite. *J Climate Appl Meteor*, 1984, 23: 491-494.
- [36] Kogan F N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polarorbiting satellite data. *Bull Amer Meteor Soc*, 1995, 76(5): 655-668.
- [37] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index(SAVI). *Remote Sens Environ*, 1988, 25(3): 295-309.
- [38] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *Int J Remote Sens*, 1990, 11: 1405-1419.
- [39] Kogan F N. Global drought watch from space. *Bull Amer Meteor Soc*, 1997, 78: 621-636.
- [40] Kogan F N. Operational space technology for global vegetation assessments. *Bull Amer Meteor Soc*, 2001, 82(9): 1949-1964.
- [41] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Adv Space Res*, 1995, 15(11): 91-100.
- [42] Liu W T, Kogan F N. Monitoring regional drought using the vegetation condition index. *Int J Remote Sens*, 1996, 17(14): 2761-2782.
- [43] Gao B C. NDWI-a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens Environ*, 1996, 58(3): 257-266.
- [44] Chandrasekar K, Sessa Sai M V R, Roy P S, et al. Land surface water index(LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS vegetation index product. *Int J Remote Sens*, 2010, 31: 3987-4005.
- [45] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens Environ*, 2002, 83(1): 195-213.
- [46] Verdin J, Klaver R. Grid-cell-based crop water accounting for the famine early warning system. *Hydrological Processes*, 2002, 16(8): 1617-1630.
- [47] Brown J F, Wardlow B D, Tadesse T, et al. The vegetation drought response index(VegDRI): A new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation. *GIScience & Remote Sensing*, 2008, 45: 16-46.
- [48] Anderson M C, Hain C, Wardlow B, et al. Evaluation of drought indices based on thermal remote sensing of evapotranspiration over the continental United States. *J Climate*, 2011, 24(8): 2025-2044.
- [49] Svoboda M, Lecomte D, Hayes M, et al. The drought monitor. *Bull Amer Meteor Soc*, 2002, 83(8): 1181-1190.
- [50] Rodell M, Houser P, Jambor U, et al. The global land data assimilation system. *Bull Amer Meteor Soc*, 2004, 85(3): 381-394.
- [51] Xia Y, Mitchell K, Michael E, et al. Continental-scale water and energy flux analysis and validation for the North American land data assimilation system project phase 2 (NLDAS-2): 1. Intercomparison and application of model products. *J Geophys Res*, 2012, 117: D03109. DOI: 10. 1029/2011JD-016048.
- [52] Mitchell K E, Lohmann D, Houser P R, et al. The multi-institution North American land data assimilation system (NL-

- DAS): Utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modelling system. *J Geophys Res*, 2004, 109; D07S90. DOI: 10. 1029/2003JD003823.
- [53] Hao Z, AghaKouchak A, Nakhjiri N, et al. Global integrated drought monitoring and prediction system. *Scientific Data*, 2014, 1; 1-10.
- [54] Hao Z, AghaKouchak A. Multivariate standardized drought index: A multi-index parametric approach for drought analysis. *Adv Water Res*, 2013, 57; 12-18.
- [55] 刘晓英, 郝卫平, 张健. 农田尺度下干旱指标及应用. *中国农业气象*, 2005, 26(2); 99-105.
- Liu X Y, Hao W P, Zhang J. Drought indicators and their applications in field scale. *Chinese J Agrometeor*, 2005, 26(2); 99-105.
- [56] 李伟光, 陈汇林, 朱乃海, 等. 标准化降水指数在海南岛干旱监测中的应用分析. *中国生态农业学报*, 2009, 17(1); 178-182.
- Li W G, Chen H L, Zhu N H, et al. Analysis of drought monitoring on Hainan Island from standardized precipitation index. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1); 178-182.
- [57] 冯建设, 王建源. 相对湿度指数在农业干旱监测业务中的应用. *应用气象学报*, 2011, 22(6); 766-772.
- Feng J S, Wang J Y. The application of relative humidity index to agricultural drought monitoring. *J Appl Meteor Sci*, 2011, 22(6); 766-772.
- [58] 于敏, 王春丽. 不同卫星遥感干旱指数在黑龙江的对比应用. *应用气象学报*, 2011, 22(2); 221-231.
- Yu M, Wang C L. Satellite remote sensing drought monitoring methods based on different biophysical indicators. *J Appl Meteor Sci*, 2011, 22(2); 221-231.
- [59] 孙灏, 陈云浩, 孙洪泉. 典型农业干旱遥感监测指数的比较及分类体系. *农业工程学报*, 2012, 28(14); 147-154.
- Sun H, Chen Y H, Sun H Q. Comparisons and classification system of typical remote sensing indexes for agricultural drought. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(14); 147-154.
- [60] 王春林, 陈慧华, 唐力生, 等. 基于前期降水指数的气象干旱指标及其应用. *气候变化研究进展*, 2012, 8(3); 157-163.
- Wang C L, Chen H H, Tang L S, et al. A daily meteorological drought indicator based on standardized antecedent precipitation index and its spatial-temporal variation. *Climate Change Research*, 2012, 8(3); 157-163.
- [61] 王澄海, 王芝兰, 郭毅鹏. GEV 干旱指数及其在气象干旱预测和监测中的应用和检验. *地球科学进展*, 2012, 27(9); 957-968.
- Wang C H, Wang L Z, Guo Y P. Application and verification of drought index in meteorology drought monitor and prediction. *Adv Earth Sci*, 2012, 27(9); 957-968.
- [62] 庄少伟, 左洪超, 任鹏程, 等. 标准化降水蒸发指数在中国区域的应用. *气候与环境研究*, 2013, 18(5); 617-625.
- Zhuang S W, Zuo H C, Ren P C, et al. Application of standardized precipitation evapotranspiration index in China. *Climatic and Environmental Research*, 2013, 18(5); 617-625.
- [63] 秦鹏程, 刘敏, 万素琴, 等. 气象干旱综合监测指数在湖北的本地化应用及其适用性分析. *气象科技*, 2014, 42(2); 341-347.
- Qin P C, Liu M, Wan S Q, et al. Modification and applicability evaluation of comprehensive monitoring index of meteorological drought in Hubei Province. *Meteor Sci Technol*, 2014, 42(2); 341-347.
- [64] 谢五三, 王胜, 唐为安, 等. 干旱指数在淮河流域的适用性对比. *应用气象学报*, 2014, 25(2); 176-184.
- Xie W S, Wang S, Tang W A, et al. Comparative analysis on the applicability of drought indexes in the Huaihe River Basin. *J Appl Meteor Sci*, 2014, 25(2); 176-184.
- [65] 王素萍, 王劲松, 张强, 等. 几种干旱指标对西南和华南区域月尺度干旱监测的适用性评价. *高原气象*, 2015, 34(6); 1616-1624.
- Wang S P, Wang J S, Zhang Q, et al. Applicability evaluation of drought indices in monthly scale drought monitoring in Southwestern and Southern China. *Plateau Meteor*, 2015, 34(6); 1616-1624.
- [66] 黄友昕, 刘修国, 沈永林, 等. 农业干旱遥感监测指标及其适用性评价方法研究进展. *农业工程学报*, 2015, 31(16); 186-195.
- Huang Y X, Liu X G, Shen Y L. Progress on remote sensing monitoring indicators and adaptability evaluation methods of agricultural drought. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(16); 186-195.
- [67] 赵雪花, 赵茹欣. 水文干旱指数在汾河上游的适用性分析. *水科学进展*, 2016, 27(4); 512-519.
- Zhao X H, Zhao R X. Applicability analysis of hydrological drought index in the upper reaches of Fenhe River. *Adv Water Res*, 2016, 27(4); 512-519.
- [68] 任福民, 史久恩. 我国干旱半干旱区降水的特征分析. *应用气象学报*, 1995, 6(4); 501-504.
- Ren F M, Shi J E. Characteristics of annual rainfall in arid and semi-arid region of China. *J Appl Meteor Sci*, 1995, 6(4); 501-504.
- [69] 李茂松, 李森, 李育慧. 中国近 50 年旱灾灾情分析. *中国农业气象*, 2003, 24(1); 7-10.
- Li M S, Li S, Li Y H. Studies on drought in the past 50 years in China. *Chinese J Agrometeor*, 2003, 24(1); 7-10.
- [70] 马柱国, 符淙斌. 1951—2004 年中国北方干旱化的基本事实. *科学通报*, 2006, 51(20); 2429-2439.
- Ma Z G, Fu C B. Basic facts of drought in northern China from 1951 to 2004. *Chinese Sci Bull*, 2006, 51(20); 2429-2439.
- [71] 王春乙, 娄秀荣, 王建林. 中国农业气象灾害对作物产量的影响. *自然灾害学报*, 2007, 16(5); 37-43.
- Wang C Y, Lou X R, Wang J L. Influence of agricultural me-

- teorological disasters on output of crop in China. *J Nat Disasters*, 2007, 16(5): 37-43.
- [72] 官丽娟,李秀芬,田宝星,等. 黑龙江省大豆不同生育阶段干旱时空特征. *应用气象学报*, 2020, 31(1): 95-104.
- Gong L J, Li X F, Tian B X, et al. Spatio-temporal characteristics of drought in different growth stages of soybean in Heilongjiang. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(1): 95-104.
- [73] 任义方,赵艳霞,王春乙. 河南省冬小麦干旱保险风险评估与区划. *应用气象学报*, 2011, 22(5): 537-548.
- Ren Y F, Zhao Y X, Wang C Y. Winter wheat drought disaster insurance risk assessment and regionalization in Henan Province. *J Appl Meteor Sci*, 2011, 22(5): 537-548.
- [74] 陈书林,刘元波,温作民. 卫星遥感反演土壤水分研究综述. *地球科学进展*, 2012, 27(11): 1192-1203.
- Chen S L, Liu Y B, Wen Z M. Satellite retrieval of soil moisture: An overview. *Adv Earth Sci*, 2012, 27(11): 1192-1203.
- [75] 伟光,易雪,侯美亨,等. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究. *中国生态农业学报*, 2012, 20(5): 643-649.
- Wei G, Yi X, Hou M T, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trend in China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(5): 643-649.
- [76] 陈丽丽,刘普幸,姚玉龙,等. 1960—2010年甘肃省不同气候区SPI与Z指数的年及春季变化特征. *生态学杂志*, 2013, 32(3): 704-711.
- Chen L L, Liu P X, Yao Y L, et al. Variation characteristics of annual and spring standardized precipitation index and Z index in different climate regions of Gansu Province, Northwest China in 1960—2010. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(3): 704-711.
- [77] 宋艳玲,蔡雯悦,柳艳菊,等. 我国西南地区干旱变化及对贵州水稻产量影响. *应用气象学报*, 2014, 25(5): 550-558.
- Song Y L, Cai W Y, Liu Y J, et al. Drought changes in Southwest China and its impacts on rice yield of Guizhou Province. *J Appl Meteor Sci*, 2014, 25(5): 550-558.
- [78] 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. *自然资源学报*, 2014, 29(4): 677-688.
- Zhou D, Zhang B, Ren P G, et al. Analysis of drought characteristics in Shaanxi Province in recent 50 years based on standardized precipitation evapotranspiration index. *J Nat Resources*, 2014, 29(4): 677-688.
- [79] 张玉静,王春乙,张继权. 基于SPEI指数的华北冬麦区干旱时空分布特征分析. *生态学报*, 2015, 35(21): 7097-7107.
- Zhang Y J, Wang C Y, Zhang J Q. Analysis of the spatial and temporal characteristics of drought in the North China Plain based on standardized precipitation evapotranspiration index. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(21): 7097-7107.
- [80] 李运刚,何娇楠,李雪. 基于SPEI和SDI指数的云南红河流域气象水文干旱演变分析. *地理科学进展*, 2016, 35(6): 758-767.
- Li Y G, He J N, Li X. Hydrological and meteorological droughts in the Red River Basin of Yunnan Province based on SPEI and SDI indices. *Progress in Geography*, 2016, 35(6): 758-767.
- [81] 王兆礼,李军,黄泽勤,等. 基于改进帕默尔干旱指数的中国气象干旱时空演变分析. *农业工程学报*, 2016, 32(2): 161-168.
- Wang Z L, Li J, Huang Z Q, et al. Spatiotemporal variations of meteorological drought in China based on scPDSI. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(2): 161-168.
- [82] 沈国强,郑海峰,雷振峰. 基于SPEI指数的1961—2014年东北地区气象干旱时空特征研究. *生态学报*, 2017, 37(17): 5882-5893.
- Shen G Q, Zheng H F, Lei Z F. Spatiotemporal analysis of meteorological drought (1961—2014) in Northeast China using a standardized precipitation evapotranspiration index. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(17): 5882-5893.
- [83] 贾艳青,张勃. 基于日SPEI的近55a西南地区极端干旱事件时空演变特征. *地理科学*, 2018, 38(3): 474-483.
- Jia Y Q, Zhang B. Spatial-temporal variability characteristics of extreme drought events based on daily SPEI in the Southwest China in recent 55 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(3): 474-483.
- [84] 艾启阳,栗晓玲,张更喜,等. 标准化地下水指数法分析黑河中游地下水时空演变规律. *农业工程学报*, 2019, 35(10): 69-74.
- Ai Q Y, Su X L, Zhang G X, et al. Constructing standardized groundwater index to analyze temporal-spatial evolution of groundwater in middle reaches of Heihe River. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(10): 69-74.
- [85] 曲学斌,杨钦宇,王慧清,等. 基于MCI的内蒙古气象干旱强度特征分析. *气象与环境科学*, 2019, 42(4): 47-54.
- Qu X B, Yang Q Y, Wang H Q, et al. Analysis of meteorological drought intensity characteristics in Inner Mongolia based on MCI. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2019, 42(4): 47-54.
- [86] 程雪,孙爽,张方亮,等. 我国北方地区苹果干旱时空分布特征. *应用气象学报*, 2020, 31(1): 63-73.
- Cheng X, Sun S, Zhang F L, et al. Spatial and temporal distributions of apple drought in northern China. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(1): 63-73.
- [87] 程雪,孙爽,张镇涛,等. 我国北方地区苹果不同干旱等级时空特征. *应用气象学报*, 2020, 31(4): 405-416.
- Cheng X, Sun S, Zhang Z T, et al. Spatial-temporal distribution of apples with different drought levels in northern China. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(4): 405-416.
- [88] 于成龙,唐权,郭春玲,等. 基于scPDSI的东北地区气象干旱时空特征分析. *气象与环境科学*, 2020, 43(3): 24-32.
- Yu C L, Tang Q, Guo C L, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics of meteorological drought in Northeast China based on scPDSI. *Meteorological and Environmental*

- Sciences, 2020, 43(3): 24-32.
- [89] 苏志诚, 马苗苗, 邢子康, 等. 人类活动影响的辽宁省大凌河流域水文干旱演变特征. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(1): 148-155.
- Su Z C, Ma M M, Xing Z K, et al. Characterizing the hydrological drought evolutions under human interventions: A case study in the Daling River Basin in Liaoning Province. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2021, 19(1): 148-155.
- [90] 米前川, 高西宁, 李玥, 等. 深度学习方法在干旱预测中的应用. 应用气象学报, 2022, 33(1): 104-114.
- Mi Q C, Gao X N, Li Y, et al. Application of deep learning method to drought prediction. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(1): 104-114.
- [91] 赵艳霞, 王馥棠, 裘国旺. 冬小麦干旱识别和预测模型研究. 应用气象学报, 2001, 12(2): 234-241.
- Zhao Y X, Wang F T, Qiu G Q. A study of assessing and forecasting models of drought in agriculture. *J Appl Meteor Sci*, 2001, 12(2): 234-241.
- [92] 王鹏新, 龚健雅, 李小文, 等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型. 地球科学进展, 2003, 18(4): 527-533.
- Wang P X, Gong J Y, Li X W, et al. Drought monitoring model based on vegetation index and land surface temperature. *Adv Earth Sci*, 2003, 18(4): 527-533.
- [93] 杨晓光, Bouman B A, 张秋平, 等. 华北平原旱稻作物系数试验研究. 农业工程学报, 2006, 22(2): 37-41.
- Yang X G, Bouman B A, Zhang Q P, et al. Crop coefficient of aerobic rice in North China. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(2): 37-41.
- [94] 王春林, 郭晶, 薛丽芳, 等. 改进的综合气象干旱指数 C<sub>new</sub> 及其适用性分析. 中国农业气象, 2011, 32(4): 621-626.
- Wang C L, Guo J, Xue L F, et al. An improved comprehensive meteorological drought index C<sub>new</sub> and its applicability analysis. *Chinese J Agrometeor*, 2011, 32(4): 621-626.
- [95] 赵海燕, 高歌, 张培群, 等. 综合气象干旱指数修正及在西南地区的使用性. 应用气象学报, 2011, 22(6): 698-705.
- Zhao H Y, Gao G, Zhang P Q, et al. The modification of meteorological drought composite index and its application in Southwest China. *J Appl Meteor Sci*, 2011, 22(6): 698-705.
- [96] 张荣华, 杜君平, 孙睿. 区域蒸散发遥感估算方法及验证综述. 地球科学进展, 2012, 27(12): 1295-1307.
- Zhang R H, Du J P, Sun R. Review of estimation and validation of regional evapotranspiration based on remote sensing. *Adv Earth Sci*, 2012, 27(12): 1295-1307.
- [97] 赵一磊, 任福民, 李栋梁, 等. 基于有效降水干旱指数的改进研究. 气象, 2013, 39(5): 600-607.
- Zhao Y L, Ren F M, Li D L, et al. Study on improvement of drought index based on effective precipitation. *Meteor Mon*, 2013, 39(5): 600-607.
- [98] 鲍艳松, 严婧, 闵锦忠, 等. 基于温度植被干旱指数的江苏淮东北地区农业旱情监测. 农业工程学报, 2014, 30(7): 163-172.
- Bao Y S, Yan J, Min J Z, et al. Agricultural drought monitoring in north Jiangsu by using temperature vegetation dryness index. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(7): 163-172.
- [99] 吕娟, 屈艳萍, 苏志诚. 旱灾风险评估方法及实证研究. 武汉: 长江出版社, 2018.
- Lv J, Qu Y P, Shu Z C. Drought Risk Assessment Method and Empirical Research. Wuhan: Changjiang Press, 2018.
- [100] 郭明, 粟晓玲. 黑河流域气象农业综合干旱指数构建及时空特征分析. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 7-15.
- Guo M, Su X L. Construction of meteorological and agricultural comprehensive drought index and analysis on spatial and temporal characteristics in Heihe River Basin. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Nat Sci Ed)*, 2019, 40(3): 7-15.
- [101] 王培娟, 马玉平, 霍治国, 等. 土壤水分对冬小麦叶片光合速率影响模型构建. 应用气象学报, 2020, 31(3): 267-279.
- Wang P J, Ma Y P, Huo Z G, et al. Construction of the model for soil moisture effects on leaf photosynthesis rate of winter wheat. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(3): 267-279.
- [102] 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. 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. *Sci China (Earth Sci)*, 2022, 52(3): 540-558.
- [103] 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. GB/T 20481—2017 气象干旱等级. 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. GB/T 20481—2017 Meteorological Drought Grade. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [104] 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. GB/T 34306—2017 干旱灾害等级. 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. GB/T 34306—2017 Drought Disaster Grade. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [105] 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. GB/T 32135—2015 区域旱情等级. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. GB/T 32135—2015 Region Drought Disaster Grade. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [106] 中华人民共和国水利部. SL663—2014 干旱灾害等级标准.

- 北京:中国水利水电出版社,2014.  
Ministry of water resources of the People's Republic of China. SL663 — 2014 Drought Disaster Grade. Beijing: China Water & Power Press, 2014.
- [107] 中国气象局. QX/T 81—2007 小麦干旱灾害等级. 北京:气象出版社,2007.  
China Meteorological Administration. QX/T 81—2007 Drought Disaster Grade of Wheat. Beijing: China Meteorological Press, 2007.
- [108] 中国气象局. QX/T 142—2011 北方草原干旱指标. 北京:气象出版社,2011.  
China Meteorological Administration. QX/T 142—2011 Drought Index of Grassland in North China. Beijing: China Meteorological Press, 2011.
- [109] 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. GB/T 29366—2012 北方牧区草原干旱等级. 北京:中国标准出版社,2012.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. QB/T 29366 — 2012 Drought Grade of Gassland in North of China. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [110] 中国气象局. QX/T 183—2013 北方草原干旱评估技术规范. 北京:气象出版社,2013.  
China Meteorological Administration. QX/T 183—2013 Technical Specification for Drought Assessment of Northern Grassland. Beijing: China Meteorological Press, 2013.
- [111] 中国气象局. QX/T 259—2015 北方春玉米干旱等级. 北京:气象出版社,2015.  
China Meteorological Administration. QX/T 259—2015 Drought Grade of Maize in North of China. Beijing: China Meteorological Press, 2015.
- [112] 中国气象局. QX/T 260—2015 北方夏玉米干旱等级. 北京:气象出版社,2015.  
China Meteorological Administration. QX/T 260—2015 Drought Grade of Summer Maize in North of China. Beijing: China Meteorological Press, 2015.
- [113] 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. GB/T 32136—2015 农业干旱等级. 北京:中国标准出版社,2016.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. GB/T 32136 — 2015 Agricultural Drought Grade. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [114] 中国气象局. QX/T 383—2017 玉米干旱灾害风险评估方法. 北京:气象出版社,2017.  
China Meteorological Administration. QX/T 383 — 2017 Risk Assessment Method of Drought Disaster for Maize. Beijing: China Meteorological Press, 2017.
- [115] 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. GB/T 34809—2017 甘蔗干旱等级. 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. GB/T 34809 — 2017 Drought Grade of Sugarcane. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [116] 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. GB/T 34817—2017 农业干旱预警等级. 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. GB/T 34817—2017 Drought Warning Grade of Agriculture. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [117] 中国气象局. QX/T 446—2018 大豆干旱等级. 北京:气象出版社,2018.  
China Meteorological Administration. QX/T 446 — 2018 Grade of Soybean Drought. Beijing: China Meteorological Press, 2018.

## Global Research Progress of Drought Indices

Song Yanling<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD),  
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

### Abstract

Drought is the most serious meteorological disaster in the world with the heaviest economic loss and the widest range, affecting social economy and people's lives. The impacts of drought are diverse, affecting agriculture, food security, water conservancy and power generation, industry, human and animal health, and so on. In recent decades, drought events occur frequently in China. Coupled with the rapid economic development and population growth, the adverse impact of drought on society and the harm to people's living environment are becoming more and more serious. Therefore, it is of great significance to discuss the global research progress of drought indices for drought research, prevention and drought relief in China. The research on meteorological drought index, agricultural drought index, hydrological drought index, remote sensing drought index and comprehensive drought index in the world are investigated systematically, especially in Europe and the United States, including the source of each drought index, the input parameters for calculation, the ease of use, advantages, disadvantages, and the global use. The progress of drought research in China is also systematically introduced, including some new drought indices or improved drought indices proposed according to the research on the local drought evolution characteristics and risks, especially a series of new industrial or national standards on drought indexes developed. The main problems in drought research is also discussed, including the lack of applicability of drought index, the lack of research on new mechanism-based drought monitoring index and the lack of research on drought prediction and early warning. Therefore, strengthening the research on drought mechanism, carrying out quantitative assessment of drought monitoring and strengthening the application of numerical models in drought prediction and early warning are the key and difficult points of future research. Drought range, degree and trend prediction are of great significance for the selection of national disaster prevention and mitigation measures. Providing drought prediction and early warning information more than one month in advance can provide sufficient time for taking disaster prevention and mitigation measures. Therefore, it is particularly important to study the simulation ability of numerical models to different regions and strengthen the application of numerical models to drought prediction and early warning.

**Key words:** drought indices; agriculture; quantitative assessment; prediction and warning