

# 中国气象农业非参数化综合干旱监测及其适用性

李 勤<sup>1</sup>, 张 强<sup>2,3,4</sup>, 黄庆忠<sup>1</sup>, 史培军<sup>2,3,4</sup>

(1. 中山大学水资源与环境系, 广州 510275; 2. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 3. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京师范大学, 北京 100875; 4. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

**摘要:** 旱灾是对人类社会影响以及致损最大的灾种之一, 如何进行可靠的旱灾监测是旱灾预警与旱灾防灾减灾的关键。气象干旱与农业干旱的综合干旱方法是目前干旱监测的主要方法之一。本文对多变量标准化干旱指数(MSDI)方法进行改进, 以非参数化的方法计算标准化降水蒸散指数(SPEI)、标准化土壤湿度指数(SS1), 提出改进的MSDI, 即气象农业综合干旱指标(MMSDI)。在此基础上, 用1979-2015年中国降水资料、蒸散发资料以及土壤湿度数据对不同时间尺度(3月尺度与6月尺度)分别研究气象干旱、农业干旱、气象农业综合干旱, 用气象农业综合干旱分别与气象干旱、农业干旱和改进之前的气象农业综合干旱对比, 并结合实际记录的干旱事件时空特征验证, 结果证实MMSDI指数可以同时监测气象与农业干旱, 且其监测结果准确度高于单一变量的气象(SPEI)或农业(SS1)干旱监测, MMSDI指数对气象农业综合干旱具有更好的监测效果, 可考虑作为中国气象农业综合干旱监测及旱灾预警的重要理论依据。

**关键词:** 干旱监测; 气象农业综合干旱; 土壤湿度; 降尺度; 非参数化

DOI: 10.11821/dlxb201801006

## 1 引言

旱灾是目前致损最为严重同时也是最为复杂的自然灾害之一。干旱持续时间长, 影响范围广, 对国民经济有重大影响<sup>[1]</sup>。据中国水旱灾害公报记载<sup>[2]</sup>, 2014年全国共26省(自治区、直辖市)发生旱灾, 作物旱灾受灾面积达12271.7千hm<sup>2</sup>, 其中成灾面积达5677.1千hm<sup>2</sup>, 绝收1484.7千hm<sup>2</sup>, 全年因旱灾粮食损失达200.65亿kg, 经济作物损失275.76亿元; 直接经济损失909.76亿元, 占当年国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)的0.14%。国际上将干旱分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱四类<sup>[3]</sup>。其中, 气象干旱通常是指降水量与蒸发量的不平衡时间较长而出现的水分短缺现象, 也是常见的灾害类型。而农业干旱是反映土壤含水量低于植物需水量的程度。干旱监测系统可以对干旱开始及持续时间、严重程度及空间分布等进行早期预警, 是国家采取防灾减灾应对的重要参考依据<sup>[4]</sup>。

目前, 气象干旱常用指标主要有标准化降水指数(Standardized Precipitation Index,

收稿日期: 2017-03-24; 修订日期: 2017-07-14

**基金项目:** 国家自然科学基金委创新群体项目(41621061); 国家杰出青年科学基金项目(51425903) [Foundation: Creative Research Groups of National Natural Science Foundation of China, No.41621061; National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China, No.51425903]

**作者简介:** 李勤(1993-), 女, 安徽界首人, 硕士生, 主要从事气象水文学研究。E-mail: sysu.kellyfish@gmail.com

**通讯作者:** 张强(1974-), 男, 山东沂水人, 博士, 教授, 博导, 主要从事流域气象水文学研究、旱涝灾害机理、流域地表水文过程及其对气候变化的响应机制以及流域生态需水等研究。E-mail: zhangq68@bnu.edu.cn

SPI)、帕尔默干旱指数 (Palmer Drought Severity Index, PDSI)、标准化降水蒸散指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) 等指数<sup>[5]</sup>。Guttman<sup>[6]</sup>用 SPI 和 PDSI 进行美国干旱监测后发现 PDSI 特征谱随地点变化而变化, 而 SPI 指标则不会发生变化。但 SPI 只考虑降水, 无法衡量其他气候因子对干旱的影响。王林等<sup>[7]</sup>利用拟合优度检验等方法全面分析了 SPEI 指数在中国干旱监测中的适用性, 认为 SPEI 指数比 SPI 指数能够更精确地刻画干旱。同时, 与 PDSI 相比, SPEI 具有多时间尺度特征。对农业干旱监测研究来讲, 主要指数有 K 指数、Palmer 指数、降水距平百分率和标准化土壤含水量指数 (Standardized Soil Moisture Index, SSMI) 等<sup>[3, 8-10]</sup>。王劲松等<sup>[11]</sup>研究认为 K 指数在西北地区的气象干旱及农业干旱监测中效果较好; 王文等<sup>[12]</sup>证实了 SSMI 对区域干旱的表征能力。气象与农业干旱对社会经济的影响及其相互作用具有非独立性与滞后性。Hao 等<sup>[13]</sup>提出了一种基于气象与农业干旱的多变量标准化干旱指数 (Multivariate Standardized Drought Index, MSDI), 并用于美国加利福尼亚州的干旱研究。MSDI 指数集合了标准化降水指数 SPI 与标准化土壤湿度指数 (Standardized Soil Moisture Index, SSI) 的特点, 考虑了降水量与土壤湿度等信息, 并且具有多时间尺度特点。由于 SPI 指数仅考虑降水的作用, 在干旱监测中有一定局限性, 因此 MSDI 的应用同样具有局限性。为综合考虑降水、蒸散发及土壤湿度对干旱的影响, 本文拟对原 MSDI 进行改进, 在 MSDI 中考虑潜在蒸散发影响, 并综合 SPEI 与 SSI 特点, 形成改进的气象农业综合干旱指标 (Modified Multivariate Standardized Drought Index, MMSDI), 并应用于中国气象农业综合干旱研究, 进而发展新的综合干旱监测方法。

## 2 数据资料

### 2.1 全球陆地数据同化系统 (GLDAS) 数据集

全球陆地数据同化系统 (GLDAS) 由美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 与美国海洋大气局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 联合开发, 采用地表观测与卫星遥感监测数据 (降水、气温和辐射等), 并通过陆面过程模型 Mosaic、Noah、CLM (Common Land Model)、和 VIC (Variable Infiltration Capacity) 模拟生成全球地表水文变量和通量数据<sup>[14]</sup>, 包括土壤含水量、地表径流、地下径流、蒸散发、表面温度和热通量等。目前 GLDAS 数据已广泛用于全球变化、水循环及卫星数据如重力恢复与气候试验 (Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE) 与中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 的结果对比分析<sup>[15-17]</sup>。其中, Dillon 等<sup>[17]</sup>曾采用 GLDAS 中 Mosaic、Noah、VIC 模型模拟的土壤含水量用于 WRF (Weather Research and Forecasting) 模型短期预测的敏感性分析。本文采用 GLDAS 的 VIC 模型模拟的土壤含水量数据, 数据集包含三层土壤含水量资料, 其深度分别为 0~0.1 m、0.1~1.6 m 和 1.6~1.9 m。由于此数据用于 SSI 指数的计算, 所表征的干旱类型是农业干旱, 因此选择表层 (0~0.1 m) 数据作为数据资料, 数据资料时间分辨率为月, 时间跨度为 1979 年 1 月-2015 年 12 月, 空间分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

### 2.2 气象数据

本文所采用的月尺度降水量、潜在蒸散发 (Potential Evapotranspiration, PET) 等气候变量来源于英国气候研究中心 Climatic Research Unit (CRU) (<http://catalogue.ceda.ac.uk>) 提供的 Time-Series (TS) Version 3.24.01 高分辨率气候栅格数据资料集, 其空间分

辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ , 此数据已得到广泛应用且用于SPEI指数的计算<sup>[18-21]</sup>。潜在蒸散发变量的计算方法采用的是联合国粮农组织 (Food and Agriculture Organization, FAO) 修正并推荐的彭曼方程<sup>[22]</sup>, 其优点是考虑了温度的变化, 能较客观地表示地表潜在蒸散发量。

### 2.3 农作物成灾面积与种植面积数据

1979-2014年全国各省市农作物成灾面积与农作物面积来源于中国植业信息网农作物数据库和灾情数据库 (<http://zzys.agri.gov.cn/nongqing.aspx>), 用于表征实际干旱情况以及MMSDI干旱监测结果的验证。

## 3 研究方法

由于气象数据与GLDAS数据集空间分辨率分别为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 和 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , 因此为了保持数据空间分辨率一致, 采用降尺度的方法对GLDAS数据集进行处理, 然后采用气象数据和降尺度后土壤湿度数据分别计算MMSDI指标与SPEI、SSI指标, 并通过对比指数分析气象农业综合干旱指标MMSDI的实际监测结果与气象干旱指标SPEI和农业干旱指标SSI的监测结果。

### 3.1 降尺度

目前较为常用的降尺度方法包括动力降尺度方法和统计降尺度方法<sup>[23]</sup>, 其中统计降尺度是处理气象模式输出的低分辨率到流域尺度数据转换的有效方法。为了便于与气象资料对应比较, 本文采用统计降尺度的线性回归方法<sup>[24]</sup>对GLDAS土壤湿度数据进行处理, 将其空间分辨率由 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 降至 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。

### 3.2 MMSDI构建

MMSDI是基于降水与土壤湿度数据的表征气象农业综合干旱的指数<sup>[13]</sup>, 此法是目前已广泛使用的SPI<sup>[25]</sup>方法的延伸, 是基于降水和土壤湿度的二维变量模型。SPEI指数<sup>[26]</sup>与SPI相比综合考虑了降水和潜在蒸散发对干旱的影响, 诸多研究表明SPEI在中国的适用性<sup>[7, 27-28]</sup>, 本文基于此原理, 综合考虑降水、潜在蒸散发以及土壤湿度对干旱的影响, 基于降水(P)与潜在蒸散发(PET)的差值(P-PET, 记为PPET)代替原MSDI中降水变量作为两变量之一与另一个土壤湿度变量(Soil Humidity, 记为SH)作为联合分布变量, 分别表示为变量X和Y, 建立基于降水、潜在蒸散发与土壤湿度的MMSDI指数(图1), 则变量X和Y的联合分布可表示为:

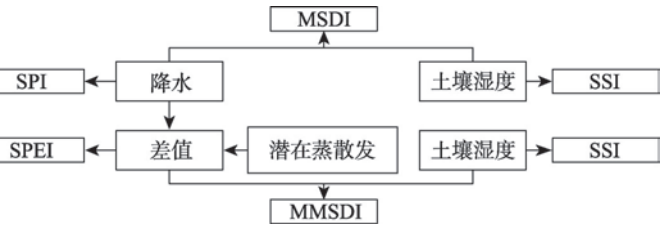


图1 MSDI与MMSDI方法对比图

Fig. 1 Comparison of working flow of MSDI and MMSDI indices

表明SPEI在中国的适用性<sup>[7, 27-28]</sup>, 本文基于此原理, 综合考虑降水、潜在蒸散发以及土壤湿度对干旱的影响, 基于降水(P)与潜在蒸散发(PET)的差值(P-PET, 记为PPET)代替原MSDI中降水变量作为两变量之一与另一个土壤湿度变量(Soil Humidity, 记为SH)作为联合分布变量, 分别表示为变量X和Y, 建立基于降水、潜在蒸散发与土壤湿度的MMSDI指数(图1), 则变量X和Y的联合分布可表示为:

$$P(X \leq x, Y \leq y) = p \quad (1)$$

即:

$$P(PPET \leq pp_{pet}, SH \leq sh) = p \quad (2)$$

式中:  $p$  表示变量X(降水与潜在蒸散发的差值, PPET)和变量Y(土壤湿度, SH)的联合分布概率。因此, MMSDI可基于联合分布概率 $p$ 定义为:

$$MMSDI = \Phi^{-1}(p) \quad (3)$$

式中:  $\Phi$  是标准正态分布函数。因此, 与SPEI类似, MMSDI可以从变量的联合概率中推导得到, 并且可以在不同时间尺度上(如1月、3月、6月和12月等)表征旱情。

为了避免对于分布的假设以及减少拟合参数分布的计算, 本文引用基于非参数化联合分布概念。经验二元联合概率可通过 Gringorten<sup>[29]</sup>提出的位置划分公式估计:

$$P(x_k, y_k) = \frac{m_k - 0.44}{n + 0.12} \quad (4)$$

式中:  $n$  是观测值的个数;  $m_k$  是关系对  $(x_i, y_i)$  中  $x_i \leq x_k$  与  $y_i \leq y_k$  ( $1 \leq i \leq n$ ) 发生的事件数。当式 (4) 中联合概率推导得出后, 即可作为输入值用式 (3) 得到 MMSDI 值。

### 3.3 SPEI 与 SSI

本文使用单变量形式 Gringorten<sup>[29]</sup>位置划分公式的经验方法推导边缘概率从而计算 SPEI 和 SSI 指数:

$$P(x_i) = \frac{i - 0.44}{n + 0.12} \quad (5)$$

式中:  $i$  是观测值从变量最小值开始到其自身值的次序;  $n$  则是观测值的样本总数。本文对各类干旱事件等级的划分参考 Hao 等<sup>[30]</sup>采用的统一标准 (表 1)。

### 3.4 对比分析

为了便于对计算结果进行比较分析, 本文根据 Hao 等<sup>[5]</sup>提出的对比指数 POD (Probability of Detection)、FAR (False Alarm Ratio)、CSI (Critical Success Index) 以及 EOD (Effect of Detection) 对计算结果的 SPEI、SSI、MMSDI 进行定量化对比:

$$\text{POD} = H / (H + M) \quad (6)$$

$$\text{FAR} = F / (H + F) \quad (7)$$

$$\text{CSI} = H / (H + M + F) \quad (8)$$

$$\text{EOD} = (H + HN) / A \quad (9)$$

式中:  $H$  (Hit) 表示 SPEI 或 SSI 为 D1~D4 等级且 MMSDI 为 D1~D4 等级的网格数;  $M$  (Miss) 表示 SPEI 或 SSI 为 D1~D4 等级且 MMSDI 为其他等级的网格数;  $F$  (False Alarm) 表示 SPEI 且 SSI 为其他等级而 MMSDI 为 D1~D4 等级的网格数;  $HN$  (Hit Null) 表示 SPEI、SSI、MMSDI 中均为其他等级的网格数;  $A$  (All) 表示网格总数。

## 4 结果与讨论

中国通常划分为七大地理分区: 西北 (图 2a)、西南 (图 2b)、华北 (图 2c)、华中 (图 2d)、华南 (图 2e)、东北 (图 2f) 和华东 (图 2g) 地区。图 2 显示七个地理分区 1979-2015 年间共 37 年的 6 个月尺度 SPEI、SSI、MSDI 和 MMSDI 干旱指标时间序列曲线, 其中每个地理分区所选取的网格均是农业、畜牧业或种植业等经济作物区, 图 2 中 -0.8 处红色直线表示无旱与干旱分界线。四种指标在不同区域的时间分布, 在趋势上不同, 但是相同的区域上, MMSDI 与 SPEI 或 SSI 的分布的趋势大致相同, 每次低于 -0.8 的时间段长度相近, 这说明由 MMSDI 决定的干旱与 SPEI 或者 SSI 表征的干旱开始时间、持续时间、结束时间以及趋势均较为一致, 不同区域的干旱情况以及趋势不同。这个结果和参数化的气象干旱综合指标相一致<sup>[13]</sup>。例如, 图 2d 中, 1990 年 9 月-1991 年 2 月 MMSDI 与 SPEI 的干旱起止时间与干旱趋势相似, 2006 年 9 月-2007 年 11 月 MMSDI 与 SSI 的干旱起止时间与干旱趋势相似等。

然而, MMSDI 所表征的干旱严重等级有时和单一变量的干旱指标 SPEI 或者 SSI 并不相同, 原因是任意两变量联合分布相对应的概率不等于其中单个变量的单变量分布相对

表 1 干旱指数等级划分表

Tab. 1 Drought severity grades and their corresponding D-scale

等级	类型	标准化指数
D <sub>0</sub>	无旱	-0.79~-0.50
D <sub>1</sub>	轻旱	-1.29~-0.80
D <sub>2</sub>	中旱	-1.59~-1.30
D <sub>3</sub>	重旱	-1.99~-1.60
D <sub>4</sub>	特旱	≤ -2.0



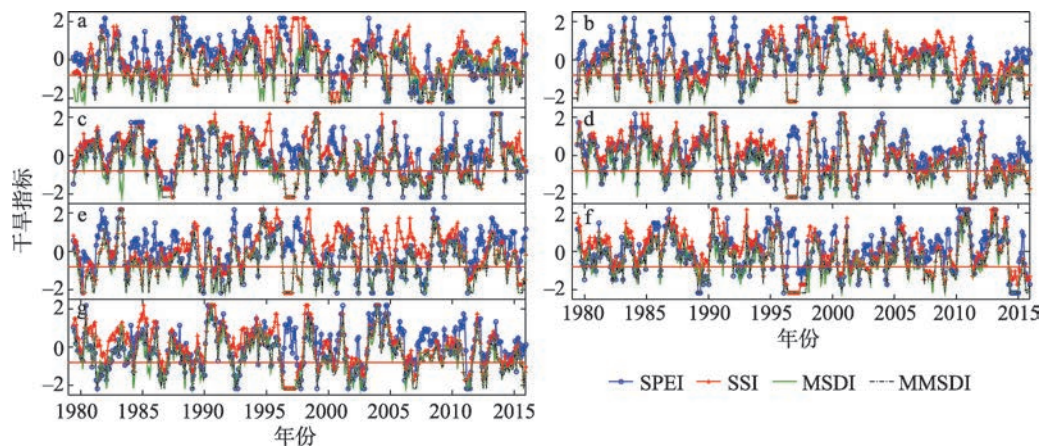


图2 中国七大地理分区6月尺度干旱指标

Fig. 2 Drought index of 6-month time scale within 7 geographical zones of China

应的概率，即多变量干旱指标MMSDI和一个单一变量干旱指标例如SSI的区别类似于两个随机变量的联合分布与其中任一个单变量对应的单一变量分布的区别。根据中国减灾记载<sup>[31]</sup>，2006年内蒙古苏尼特草原持续旱灾，受灾草场面积23186.7 km<sup>2</sup>。2006年5月中旬以来，重庆市遭遇大旱灾。2009年春，干旱波及中国12个省份<sup>[32]</sup>，河北南部、山西东南部、河南西南部等地一度达到特旱。另外，根据中国水旱灾害公报<sup>[2]</sup>记录，2014年中国大面积发生旱灾。因此，为了进一步研究MMSDI在中国地区对气象农业干旱监测效果，本文选取2006年春、2009年冬以及2014年SPEI，SSI，MSDI和MMSDI四种指标分别在3月尺度和6月尺度下的空间分布。

4.1 2006年春季干旱

图3和图4分别为中国2006年春季（3-5月）SPEI、SSI、MSDI和MMSDI四个指标分别在3月尺度和6月尺度表征的干旱等级空间分布。由图3和图4可知，3-5月气象干旱分布主要集中在华北及东北地区；农业干旱分布面积较气象干旱大，且分布集中区域也

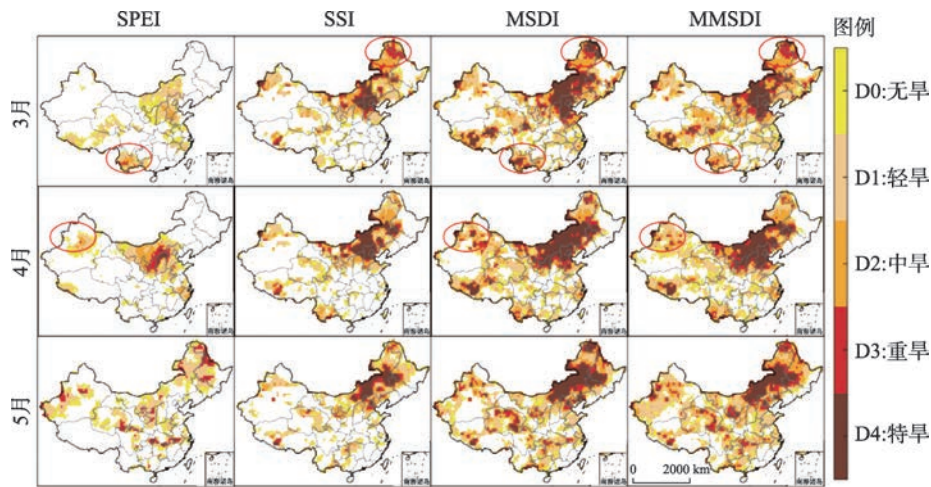


图3 3月尺度2006年春中国SPEI、SSI、MSDI、MMSDI分布

Fig. 3 Spatial pattern of SPEI, SSI, MSDI and MMSDI for the spring of 2006 at 3-month time scale, China

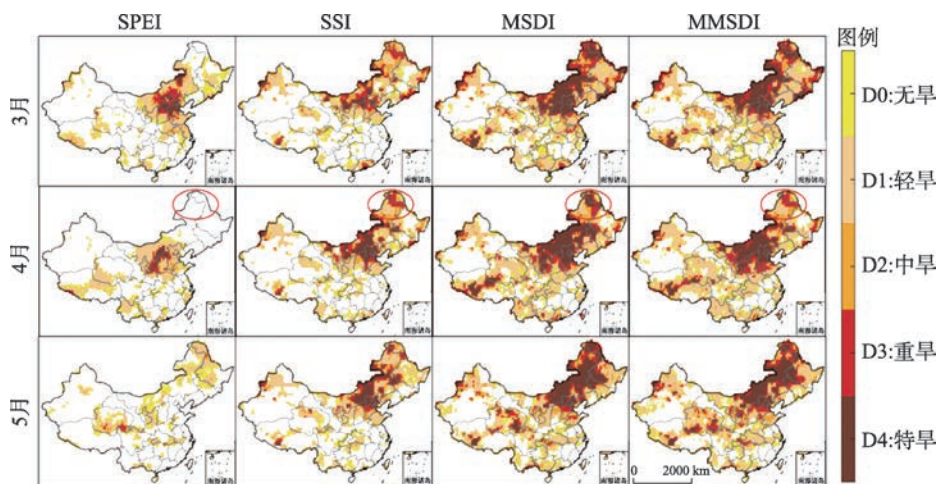


图4 6月尺度2006年春中国SPEI、SSI、MSDI、MMSDI分布

Fig. 4 Spatial pattern of SPEI, SSI, MSDI and MMSDI for the spring of 2006 at 6-month time scale, China

在华北及东北地区，其中新疆西北部地区整个春季均发生农业干旱；根据中国减灾2006年报告，全国有30多个省（自治区、直辖市）发生了不同程度的干旱灾害，损失总体偏重<sup>[31]</sup>。在华北北部即内蒙古自治区等地、华南西南部、西南南部、西北地区的甘肃和宁夏的部分地区出现严重且范围较广的春旱<sup>[31]</sup>，其结果与SPEI及SSI指标共同呈现的干旱区域基本一致，但单一的气象干旱指标没有监测出宁夏和甘肃的春季严重干旱。对比由MMSDI计算的气象农业综合干旱分布情况可知，SPEI与SSI指标指示的干旱空间分布均能完整呈现，即气象农业综合干旱指标MMSDI可同时表示气象干旱分布与农业干旱分布，同时能够监测到单一干旱指标无法监测到的干旱地区，且在不同月尺度下监测结果较为一致。对比MSDI与MMSDI干旱空间分布可知，MSDI所表征的干旱空间分布与MMSDI基本一致，但在红框所示区域有较大的不同，主要表现为MSDI所表征的干旱等级高于SPEI或SSI所表征的干旱等级，而MMSDI所表征的干旱等级则与SPEI较为接近。

#### 4.2 2009年冬季干旱

图5和图6为2009年冬季（2009年12月-2010年2月）3月尺度和6月尺度四个指标下干旱分布图。由气象干旱分布可知，内蒙古、河北和辽宁三省交界处在前两个月发生特旱或重旱；从西南地区的云南省往东北方向经华中地区至华东的山东省的条状区域有严重干旱，且从云南往山东方向干旱等级逐渐降低且干旱覆盖范围逐渐缩小，这证实由于热带西太平洋、中印半岛、孟加拉湾和青藏高原东部（特别是云贵高原）大气环流的严重异常导致2009年秋季至2010年春季西南地区发生的严重干旱<sup>[32]</sup>。农业干旱中，这3个月中的干旱特征相似，内蒙古和辽宁的交界处、云贵广三省交界处有重旱或特旱发生，东北和西南区域零散地出现中旱或轻旱，只监测到西南地区三省交界处有小范围的重旱。由MMSDI分布图可知，气象农业综合干旱分布较气象干旱或者农业干旱严重且分布范围更广，2009年12月和2010年1月，西南地区、内蒙古和辽宁以及河北三省交界处、华中出现重旱或特旱，华北、东北、西北、西南大范围发生轻旱或中旱；2010年2月，和前两个月不同的是西藏中东地区出现重旱或特旱，成功监测到了西南地区的罕见干旱。MSDI与MMSDI分区差异，图5中MSDI没有监测到SPEI所监测到的干旱分布，而MMSDI则较为准确地监测到旱情的发生。



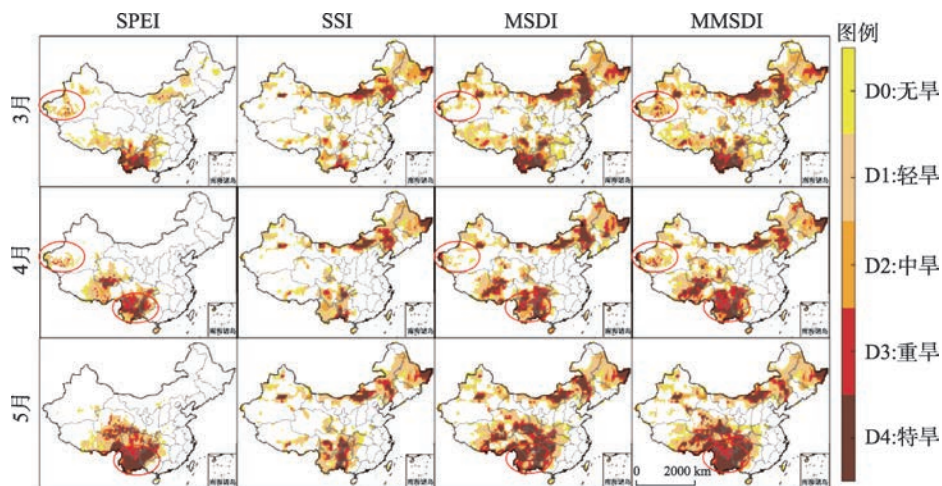


图5 3月尺度2009年冬中国SPEI、SSI、MSDI、MMSDI分布

Fig. 5 Spatial pattern of SPEI, SSI, MSDI and MMSDI for the winter of 2009 at 3-month time scale, China

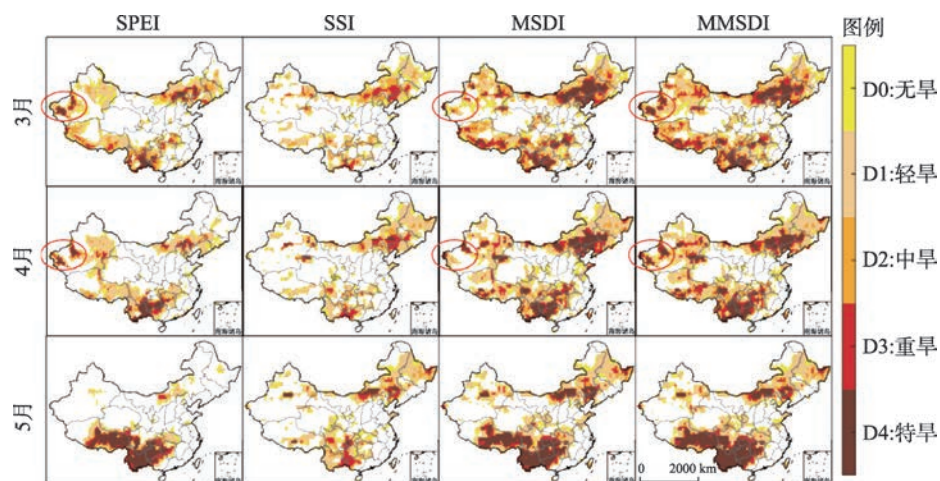


图6 6月尺度2009年冬中国SPEI、SSI、MSDI、MMSDI分布

Fig. 6 Spatial pattern of SPEI, SSI, MSDI and MMSDI for the winter of 2009 at 6-month time scale, China

### 4.3 2014年干旱

2014年, 全国旱情发展主要经历了冬春旱和夏伏旱两个阶段<sup>[33]</sup>, 其中冬春旱主要发生在山西、河南、河北、山东、甘肃等冬麦区<sup>[33]</sup>。图7~图10分别为2014年1-6月与7-12月的3月尺度与6月尺度四个指标下干旱分布图。在气象干旱分布图中, 安徽、河南、湖北、山东、河北等地1-3月、7-8月干旱较为严重; 东北三省与内蒙古四省交界处4月旱情较为严重, 5月开始有所减缓; 西北和西南地区总体干旱趋势为1-5月干旱所占面积增大, 干旱严重等级上升。对于农业干旱, 干旱覆盖面积较广, 总体干旱严重等级较轻, 局部有较高等级的干旱, 北部干旱较为严重, 中部往东大范围被干旱所覆盖。东北三省以及内蒙古和北疆局部区域有较为严重的干旱, 例如, 7-12月的吉林有重旱或特旱。对于MMSDI气象农业综合干旱分布, 2014年中国大范围处于干旱状态, 局部旱情严重, 上半年较下半年的干旱较为严重。以东北三省和内蒙古为代表的东北区域旱情在4-12月

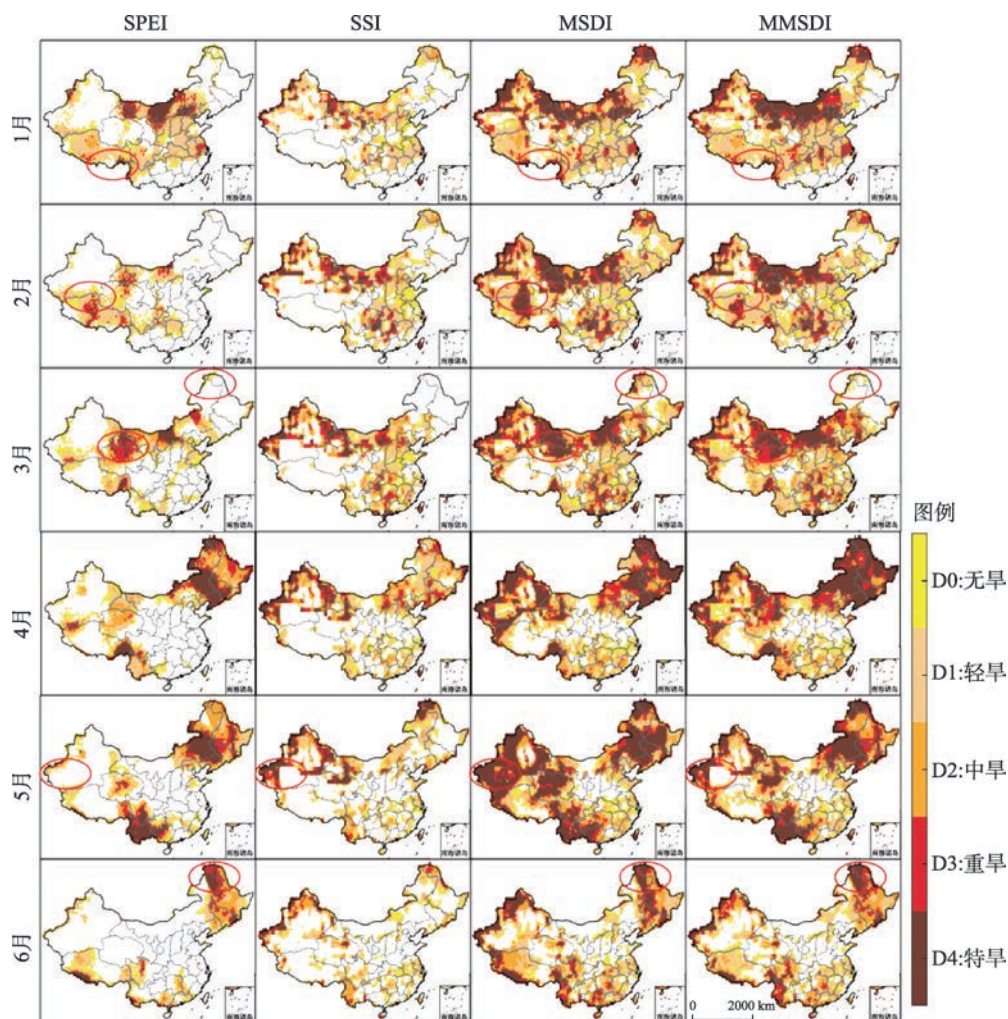


图7 3月尺度2014年1-6月中国SPEI、SSI、MSDI、MMSDI分布

Fig. 7 Spatial pattern of SPEI, SSI, MSDI and MMSDI from January to June in 2014 at 3-month time scale, China

出现重旱或特旱，且覆盖面积较大，整体呈先增后减，再上升后下降的趋势，在5月份达到较为严重，8月之后，干旱较为集中在吉林和辽宁。山西、河南、河北、山东和湖北等中部地区，全年都有旱情，在年初和6-8月份显得尤为严重，与这些地方在2014年的夏伏旱较吻合<sup>[33]</sup>。MMSDI气象农业综合干旱成功监测到了山西、河南、山东和云南等地的冬春旱以及辽宁、吉林、河南和内蒙古等地的夏伏旱。对于2014年的MSDI所监测的干旱情况与MMSDI主要不同在于监测到的干旱范围偏大，如图7中2月与5月中红框所示；另外的不同在于MSDI监测结果干旱等级偏高，如图7中6月与图9中7月所示。

#### 4.4 MMSDI结果验证

图11为2014年气象干旱与农业干旱网格在气象农业综合干旱网格中的对应值分别在3月和6月尺度下的POD, FAR, CSI和EOD曲线。虽然尺度不同，但是其POD, FAR, CSI和EOD的分布状况相似。由图11可知，POD的值均为1，即气象干旱或农业干旱中为干旱的网格在气象农业综合干旱中的对应位置同样必为干旱，即气象农业综合干旱可以监测到气象干旱或农业干旱的发生。CSI和EOD均接近于1且EOD的值要大于CSI；



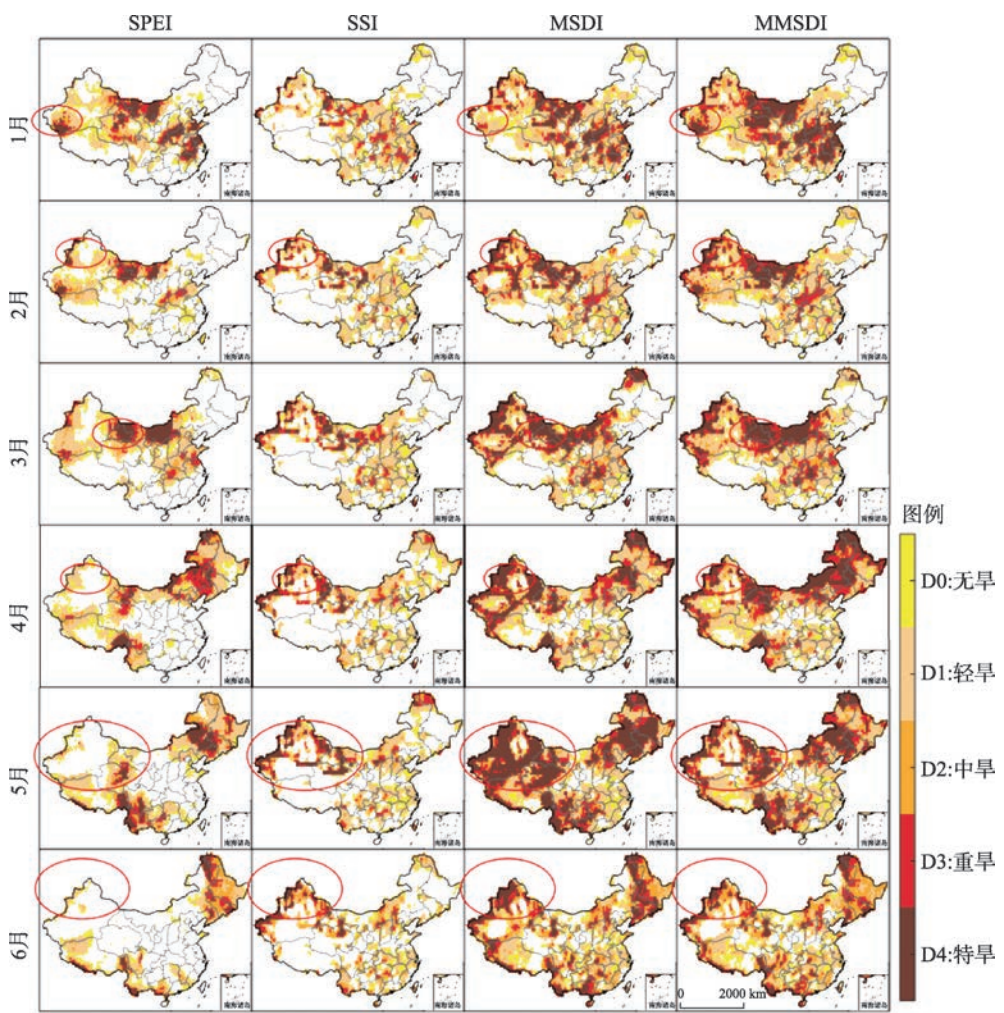


图8 6月尺度2014年1-6月中国SPEI、SSI、MSDI、MMSDI分布

Fig. 8 Spatial pattern of SPEI, SSI, MSDI and MMSDI from January to June in 2014 at 6-month time scale, China

CSI接近1, 表明气象干旱或农业干旱发生且气象农业综合干旱均发生占气象农业综合干旱发生的比例接近于1; EOD接近1, 表明气象干旱或农业干旱发生且气象农业综合干旱发生与气象干旱和农业干旱均不发生且气象农业综合干旱也不发生占有所有情况的比例接近于1。FAR不为0, 说明了气象农业综合干旱并不只是气象干旱和农业干旱的简单的相加, 它同时能够监测到气象干旱或农业干旱中监测不到的干旱区域。

图12反映的是SPEI、SSI和MMSDI三种指标所监测到的各省(直辖市)干旱等级为D4的干旱面积百分比在1979-2014年的干旱监测情况与农作物成灾面积百分比的对比结果, 即在每个省份(直辖市)中干旱指标监测与实际干旱结果相比较为准确的省份数量所占的百分比。从图中可以看出, 除了少数年份干旱监测结果是SPEI或SSI较为准确外, MMSDI的监测结果总体上较SPEI和SSI指标更接近真实干旱情况, 其中, 1979-1982年、1984-1993年、1995年、1999-2003年以及2006-2010年这25个年份均为MMSDI占较大百分比, 即在较多的省或市上, 气象农业综合干旱指标MMSDI监测效果优于气象干旱指标SPEI和农业干旱指标SSI的监测效果。

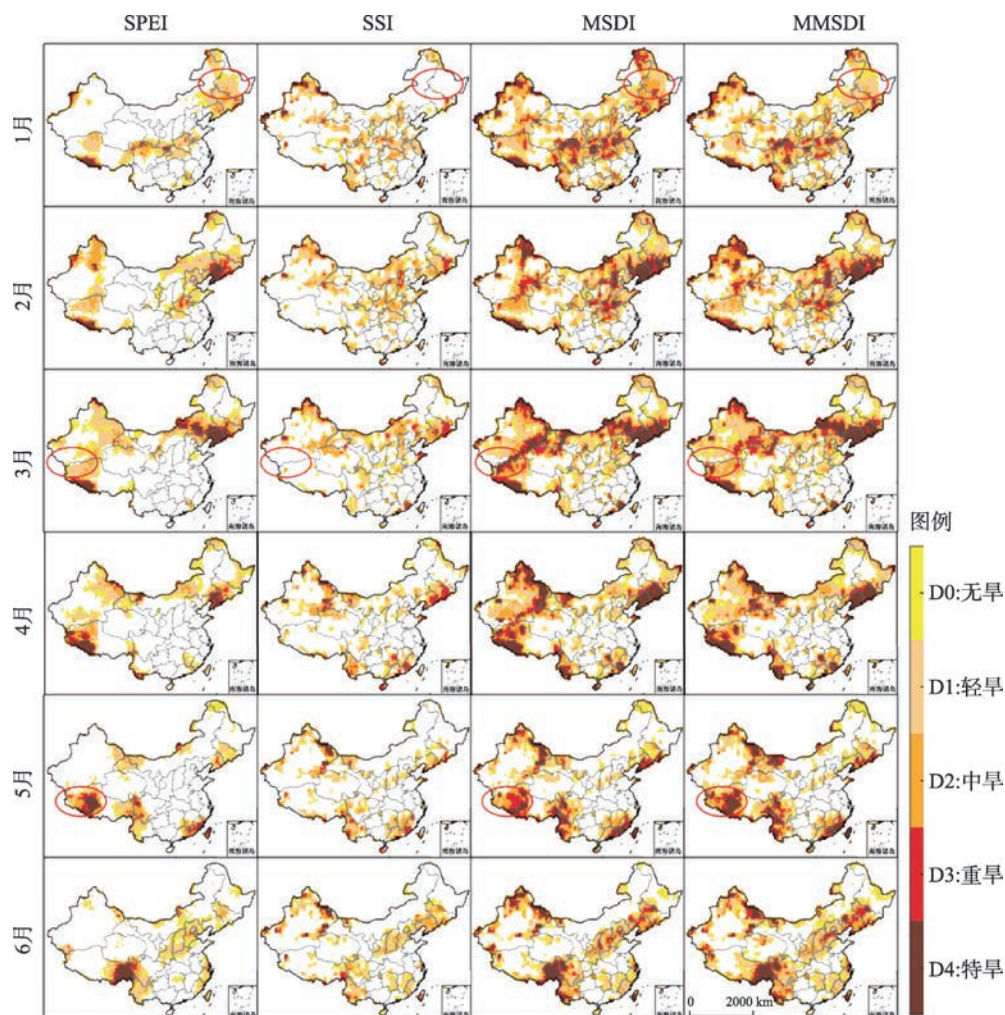


图9 3月尺度2014年7-12月中国SPEI、SSI、MSDI、MMSDI分布

Fig. 9 Spatial pattern of SPEI, SSI, MSDI and MMSDI from July to December in 2014 at 3-month time scale, China

## 5 结论

(1) 本文在总结已有干旱监测指数构建理论基础上, 对Hao等<sup>[5]</sup>提出的MSDI综合干旱指标进行了改进, 提出了新的MMSDI指数, 本文新提出的综合干旱指数在考虑降水和土壤湿度基础上加入潜在蒸散发变量, 建立综合考虑降水、潜在蒸散发及土壤湿度对气象干旱、农业干旱及气象农业综合干旱的影响作用的气象农业综合干旱指标。同时, 在改进时, 该指数引用基于非参数化联合分布概念, 从而有效避免了分布假设的影响, 并显著减少了拟合参数分布的计算量, 极大提高了计算效率。

(2) 为进一步探讨本文新提出的MMSDI方法在中国干旱监测中的适用性, 本文以中国2006年春、2009年冬与2014年的3月尺度和6月尺度的SPEI、SSI、MSDI和MMSDI的气象干旱、农业干旱及气象农业综合干旱进行对比分析, 通过对比, 本文计算的MMSDI干旱监测结果与实际观测与记载的干旱事件及其发生范围基本一致, 进一步



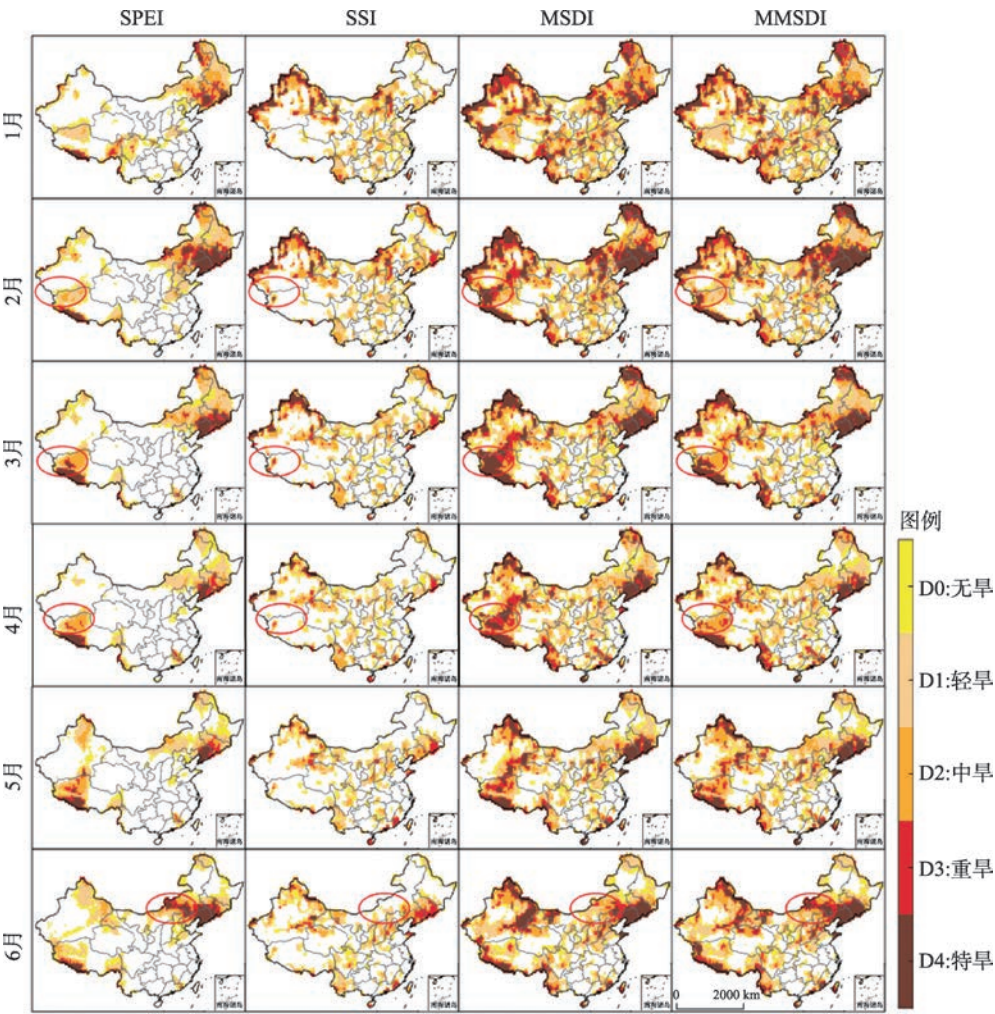


图 10 6月尺度2014年7-12月中国SPEI、SSI、MSDI、MMSDI分布

Fig. 10 Spatial pattern of SPEI, SSI, MSDI and MMSDI from July to December in 2014 at 6-month time scale, China

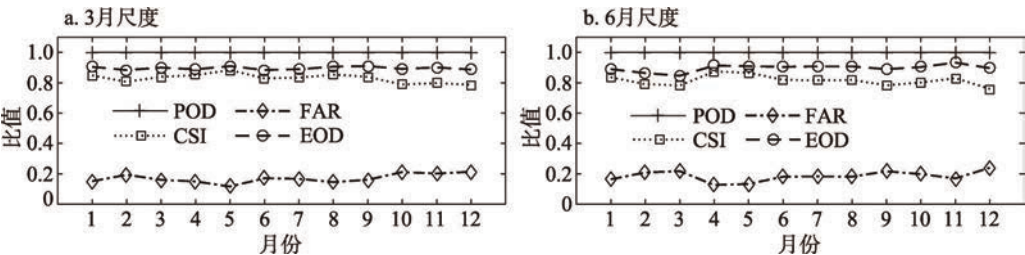


图 11 3月和6月尺度2014年中国POD、FAR、CSI、EOD

Fig. 11 Trend of POD, FAR, CSI and EOD of China in 2014 at 3-month and 6-month time scales

论证了本文提出的MMSDI方法适用于中国大范围干旱监测，从而为中国大范围干旱灾害监测与旱灾预警提供了关键理论依据与科技支撑。

(3) 通过MSDI与MMSDI干旱分布对比可知，MMSDI在干旱监测范围与干旱严重程度等级方面与SPEI和SSI干旱分布更为接近，综合降水与潜在蒸散发及土壤湿度的MMSDI



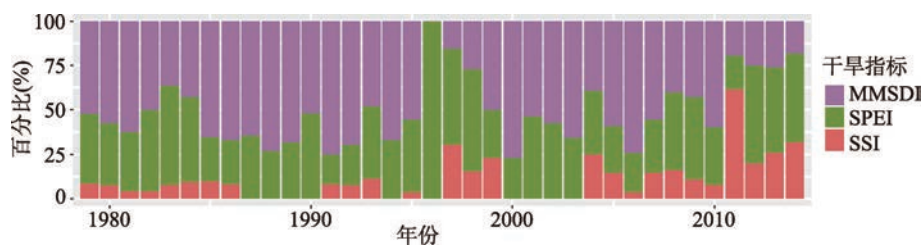


图 12 SPEI、SSI、MMSDI 监测准确度百分比

Fig. 12 Percentage of SPEI, SSI and MMSDI monitoring accuracy

所表征的气象农业综合干旱更为可靠。

(4) 气象干旱与农业干旱有联系, 也有区别, 两者在时空分布有一定差异性以及时滞性, 本文研究进一步验证了气象农业综合干旱比气象干旱与农业干旱更为准确地监测到实际干旱旱情, 同时能够监测到气象干旱或农业干旱没有监测到的干旱区域。从而为旱灾的精准空间定位以及无遗漏受灾区域的监控提供了重要旱灾监测方法, 对于推进中国气象农业综合灾害的监测与预警具有重要理论与现实意义。

## 参考文献(References)

- [1] Xiao Mingzhong, Zhang Qiang, Chen Xiaohong. Spatial-temporal patterns of drought risk across the Pearl River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 83-92. [肖名忠, 张强, 陈晓宏. 基于多变量概率分析的珠江流域干旱特征研究. *地理学报*, 2012, 67(1): 83-92.]
- [2] State Flood Control and Drought Relief Headquarters, The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *China Flood and Drought Bulletin 2014*. Beijing: China Water Power Press, 2015: 1-54. [国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. *中国水旱灾害公报 2014*. 北京: 中国水利水电出版社, 2015: 1-54.]
- [3] Maity R, Suman M, Verma N K. Drought prediction using a wavelet based approach to model the temporal consequences of different types of droughts. *Journal of Hydrology*, 2016, 539: 417-428.
- [4] Hayes M, Svoboda M, Wall N, et al. The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92(4): 485-488.
- [5] Hao Z, AghaKouchak A. A nonparametric multivariate multi-index drought monitoring framework. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(1): 89-101.
- [6] Guttman N B. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 113-121.
- [7] Wang Lin, Chen Wen. Applicability analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in drought monitoring in China. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(2): 423-431. [王林, 陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析. *高原气象*, 2014, 33(2): 423-431.]
- [8] Rhee J, Im J, Carbone G J. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(12): 2875-2887.
- [9] Zhang X, Chen N, Li J, et al. Multi-sensor integrated framework and index for agricultural drought monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 188: 141-163.
- [10] Ho M, Lall U, Cook E R. Can a paleo drought record be used to reconstruct streamflow? A case study for the Missouri River Basin. *Water Resources Research*, 2016, 52(7): 5195-5212.
- [11] Wang Jinsong, Guo Jiangyong, Qing Jizu. Application of a kind of K drought index in the spring drought analysis in Northwest China. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(5): 709-717. [王劲松, 郭江勇, 倾继祖. 一种 K 干旱指数在西北地区春旱分析中的应用. *自然资源学报*, 2007, 22(5): 709-717.]
- [12] Wang Wen, Wang Peng, Cui Wei. A comparison of terrestrial water storage data and multiple hydrological data in the Yangtze River Basin. *Advances in Water Science*, 2015, 26(6): 759-768. [王文, 王鹏, 崔巍. 长江流域陆地水储量与多源水文数据对比分析. *水科学进展*, 2015, 26(6): 759-768.]
- [13] Hao Z, AghaKouchak A. Multivariate standardized drought index: A parametric multi-index model. *Advances in Water*

- Resources, 2013, 57: 12-18.
- [14] Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The global land data assimilation system. American Meteorological Society, 2004, 85(3): 381-394.
- [15] Wang Wen, Wang Xiaojun, Wang Peng. Assessing the applicability of GLDAS monthly precipitation data in China. *Advances in Water Science*, 2014(6): 769-778. [王文, 汪小菊, 王鹏. GLDAS 月降水数据在中国区的适用性评估. *水科学进展*, 2014(6): 769-778.]
- [16] Yang T, Wang C, Yu Z, et al. Characterization of spatio-temporal patterns for various GRACE- and GLDAS-born estimates for changes of global terrestrial water storage. *Global and Planetary Change*, 2013, 109: 30-37.
- [17] Dillon M E, Collini E A, Ferreira L J. Sensitivity of WRF short-term forecasts to different soil moisture initializations from the GLDAS database over South America in March 2009. *Atmospheric Research*, 2016, 167: 196-207.
- [18] Zhang R, Yuan Y, Gou X, et al. Tree-ring-based moisture variability in western Tianshan Mountains since A.D. 1882 and its possible driving mechanism. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 218-219: 267-276.
- [19] Wu G, Liu X, Chen T, et al. Elevation-dependent variations of tree growth and intrinsic water-use efficiency in Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) in the western Tianshan Mountains, China. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6.
- [20] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, et al. A new global 0.5° gridded dataset (1901-2006) of a multiscalar drought index: Comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(4): 1033-1043.
- [21] Wang X, Piao S, Ciais P, et al. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in North America from 1982 to 2006. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(4): 1240-1245.
- [22] Kra E. FAO-56 Penman-Monteith DailyET<sub>0</sub> from Linear Regression Calibrated Hargreaves Equation with wind terms in tropics with limited data. *International Journal of Agronomy*, 2014: 1-9.
- [23] Fang J, Du J, Xu W, et al. Spatial downscaling of TRMM precipitation data based on the orographical effect and meteorological conditions in a mountainous area. *Advances in Water Resources*, 2013, 61: 42-50.
- [24] Immerzeel W W, Rutten M M, Droogers P. Spatial downscaling of TRMM precipitation using vegetative response on the Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(2): 362-370.
- [25] McKee T, Doesken N J, John K. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eighth Conf. on Applied Climatology*, 1993: 179-184.
- [26] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [27] Liu Ke, Jiang Dabang. Analysis of dryness/wetness over China using standardized precipitation evapotranspiration index based on two evapotranspiration algorithms. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 39(1): 23-36. [刘珂, 姜大膀. 基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国干湿变化的分析. *大气科学*, 2015, 39(1): 23-36.]
- [28] Zhuang Shaowei, Zuo Hongchao, Ren Pengcheng, et al. Application of standardized precipitation evapotranspiration index in China. *Climatic and Environmental Research*, 2013, 18(5): 617-625. [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.]
- [29] Gringorten I I. A plotting rule for extreme probability paper. *Journal of Geophysical Research*, 1963, 68(3): 813-814.
- [30] Hao Z, AghaKouchak A, Nakhjiri N, et al. Global integrated drought monitoring and prediction system. *Scientific Data*, 2014, 1.
- [31] National Drought in 2006. *Disaster Reduction in China*, 2007(2): 8-9. [2006 年全国旱灾情况. *中国减灾*, 2007(2): 8-9.]
- [32] Huang Ronghui, Liu Yong, Wang Lin, et al. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, 36(3): 443-457. [黄荣辉, 刘永, 王林, 等. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析. *大气科学*, 2012, 36(3): 443-457.]
- [33] Sun Yuanbin. National drought and drought action in 2014. *China Flood & Drought Management*, 2015(1): 21-24. [孙远斌. 2014 年全国旱灾及抗旱行动情况. *中国防汛抗旱*, 2015(1): 21-24.]

## Nonparametric integrated agro-meteorological drought monitoring in China: New monitoring technique and applicability

LI Qin<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>2,3,4</sup>, HUANG Qingzhong<sup>1</sup>, SHI Peijun<sup>2,3,4</sup>

(1. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;  
2. Key Laboratory of Environmental Changes and Natural Hazards, Ministry of Education, Beijing Normal  
University, Beijing 100875, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing  
100875, China; 4. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University,  
Beijing 100875, China)

**Abstract:** Drought is one of the most catastrophic natural hazards which have severe impacts on human society and yet it is the least understood hazard. Monitoring drought in a reliable way plays a critical role in the early warning as well as the mitigation of drought hazard. Generally, the integrated agro-meteorological drought monitoring is one of the most popular drought monitoring methods and it is the key step to mitigate droughts effectively. However, the originally developed integrated drought monitoring index included nothing about evapotranspiration, and it does perform not well in reflecting impacts of evapotranspiration on occurrence of droughts. In this case, this study attempted to propose an improved version of the multivariate standardized drought index (MSDI) using standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and standardized soil moisture index (SSI), i.e. modified multivariate standardized drought index (MMSDI). Based on the statistical records of drought-affected crop area in 7 geographical zones across China, this study tests the applicability of MMSDI in drought monitoring across China in 3-month and 6-month time scales, with comparison to the meteorological drought monitored by SPEI, agricultural drought monitored by SSI and integrated agro-meteorological drought monitored by MSDI. The result indicates that MMSDI can monitor meteorological drought and agricultural drought simultaneously. Furthermore, MMSDI has greater superiority than SPEI, SSI and MSDI in the veracity of drought monitoring. Besides, MMSDI can monitor droughts in bad conditions where meteorological drought and agricultural drought monitoring technique cannot be applied. Moreover, MSDI tends to overestimate the drought intensity and the size of drought-affected regions across China. In sum, MMSDI proposed in this study can be used to monitor and detect drought conditions in a more accurate way from perspectives of meteorological drought and agricultural drought. Meanwhile, drought conditions monitored by MMSDI are very close to in-situ observations and to the real-world observations of droughts in terms of drought-affected regions and related losses. In this sense, this study provides a theoretical foundation for large-scale drought monitoring across China, and provides practical regional case studies for related research in other regions of the world.

**Keywords:** drought monitoring; integrated agro-meteorological drought; soil moisture; downscaling; nonparametric drought monitoring method