

# 中国西南地区历年月度干旱指数（1951–2016） 和 8 天频率土壤湿度（2007–2016）数据集

胡光成<sup>1</sup>, 周杰<sup>2</sup>, 卢静<sup>1</sup>, 郑超磊<sup>1</sup>, 贾立<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079

**摘要:** 自适应帕尔默干旱指数 scPDSI 综合考虑了降水和蒸散发两个影响水分盈亏状况的因素, 对全球气候显著变暖背景下中国西南地区的气候干湿程度变化具有良好的响应能力。基于 1951–2016 年中国西南地区格点化的 scPDSI 数据以及 2007–2016 年 ESA CCI 主动微波遥感数据, 作者通过反演土壤湿度数据进行区域统计分析和标准化处理, 研发出中国西南地区在气候变暖背景下的干湿程度变化特征以及表层土壤湿度的响应特征数据集。数据集包括覆盖中国西南地区数据: (1) 1951–2016 年历年月度 scPDSI 干旱指数数据; (2) 2007–2016 年间 8 天频率主动微波遥感土壤湿度百分比数据; (3) 2007–2016 年间 8 天频率标准化 CCI 土壤湿度时间序列数据。数据集由 2 个数据文件组成, 分别存储为.xls 和.tif 数据格式, 数据量为 98 KB (压缩为 1 个文件, 数据量为 31.7 KB)。

**关键词:** 干旱指数; 土壤湿度; 干湿程度变化; 时间序列; 中国西南地区; 1951–2016

**DOI:** <https://doi.org/10.3974/geodp.2020.03.05>

**数据可用性声明:**

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2020.04.17.V1>.

## 1 前言

中国西南地区包括四川省、重庆市、云南省、贵州省及广西壮族自治区等西南五省 (区、市), 国土面积达 136.23 万 km<sup>2</sup>。西南地区位于中国南部偏西, 受东亚季风和南亚热带季风影响, 气候类型多样。区域气候受局地因子的影响较大, 属于典型的气候多变区。西南地区水热条件较为优越, 但是随着全球气候显著变暖, 区域气候趋于暖干化发展, 极端干旱事件异常严重。近年来气候湿润的中国西南地区干旱灾害频发, 例如 2006 年夏季四川和重庆特大干旱、2009 年秋至 2010 年春西南 5 省干旱、2011 年西南地区夏秋连旱。

收稿日期: 2020-07-21; 修订日期: 2020-09-11; 出版日期: 2020-09-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部 (2017YFD0300402); 国家自然科学基金 (41701495)

\*通讯作者: 贾立 I-1457-2014, 中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点实验室, [jjiali@aircas.ac.cn](mailto:jjiali@aircas.ac.cn)

数据引用方式: [1] 胡光成, 周杰, 卢静等. 中国西南地区历年月度干旱指数 (1951–2016) 和 8 天频率土壤湿度 (2007–2016) 数据集[J]. 全球变化数据学报, 2020, 4(3): 248–256. <https://doi.org/10.3974/geodp.2020.03.05>.

[2] 胡光成, 周杰, 卢静等. 中国西南地区历年月度干旱指数 (1951–2016) 和 8 天频率土壤湿度 (2007–2016) 数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.04.17.V1>.

随着气象及相关学科的发展，目前气候变化及干旱监测研究中已发展数十种定量反映气候干湿程度变化的指数，例如仅依赖降水的单要素指数、降水与温度要素相结合的指数、标准化指数、基于卫星遥感技术建立的指数等。其中，常用的指数包括降水距平百分率（Precipitation Anomaly Percentage, PAP）、标准化降水指数（Standardized Precipitation Index, SPI）、标准化降水蒸散发指数（Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI）<sup>[1]</sup>、帕尔默干旱指数（Palmer Drought Severity Index, PDSI）等。降水距平百分率 PAP 和标准化降水指数 SPI 主要基于长时间序列的降水数据来建立，在反映气候变暖背景下的干湿状况变化方面存在一定的局限性。标准化降水蒸散发指数 SPEI 和帕尔默干旱指数 PDSI 同时考虑降水和蒸散发对于水分收支平衡的影响，其中帕尔默干旱指数 PDSI 基于土壤水分平衡方程来综合反映降水和蒸散发的作用，并通过不断修正和改进得到自适应帕尔默干旱指数（self-calibrating PDSI, scPDSI）<sup>[2]</sup>，物理意义更为明确。因此，本文基于 1951–2016 年中国西南地区格点化的自适应帕尔默干旱指数 scPDSI 来提取其年际变化趋势，对 2007–2016 年 ESA CCI（European Space Agency Climate Change Initiative）主动微波遥感反演土壤湿度数据进行标准化处理，在此基础上分析该区域在全球气候显著变暖背景下的干湿程度变化特征以及表层土壤湿度的响应特征，以期为系统分析西南地区气候的时空演变规律以及干旱灾害的监测与评估提供科学依据。

## 2 数据集元数据简介

《中国西南地区历年月度干旱指数（1951–2016）和8天频率土壤湿度（2007–2016）数据集》<sup>[3]</sup>的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表1。

## 3 数据研发方法

### 3.1 算法原理

帕尔默干旱指数（PDSI）是一个常用的反映气候干湿程度变化的指标，在水文、气象、农业等领域广泛应用。PDSI 是基于土壤水分平衡原理来表征在一段时间内，该地区实际水分供应持续地少于（或多于）当地气候适宜水分供应的水分亏缺（或盈余）状况。PDSI 指数是水分盈亏和持续时间的函数，在计算水分收支平衡时，考虑了前期持续一段时间内的降水量和水分供需，物理意义较为明确，能够反映大尺度的土壤水分动态变化过程。由于考虑前期持续时间因子的影响，PDSI 所表征的气候干湿程度变化的时间尺度通常是 9–12 个月，能够有效降低短期气候波动的影响。PDSI 指数与当地的气候背景有关，而自适应帕尔默干旱指数 scPDSI 对其中的气候特征值和持续时间因子进行修正，克服了 PDSI 的适用局限性，可以对不同地区、不同时间的水分盈亏状况进行监测评估和对比分析<sup>[2]</sup>。经过标准化处理后，scPDSI 数值一般在–5（干旱）与+5（湿润）之间变化（表2）。研究中采用的自适应帕尔默干旱指数 scPDSI 数据集来源于英国东英吉利（East Anglia）大学气候研究中心 Climatic Research Unit（CRU）<sup>[5]</sup>，时间范围覆盖 1901–2016 年，时空分辨率为 0.5°/1 月。

表 1 《中国西南地区历年月度干旱指数（1951–2016）和 8 天频率土壤湿度（2007–2016）数据集》元数据简表

| 条 目       | 描 述   |
|-----------|---|
| 数据集名称     | 中国西南地区历年月度干旱指数（1951–2016）和 8 天频率土壤湿度（2007–2016）数据集  |
| 数据集短名     | scPDSI(1951-2016)_CCI-SoilMoisture(2007-2016)_SW_China  |
| 作者信息      | 胡光成 L-6160-2016, 中国科学院空天信息创新研究院, hugc@aircas.ac.cn<br>周杰 G-6760-2011, 华中师范大学, zhou.j@mail.ccnu.edu.cn<br>卢静 L-4754-2016, 中国科学院空天信息创新研究院, lujing@aircas.ac.cn<br>郑超磊 L-6182-2016, 中国科学院空天信息创新研究院, zhengcl@aircas.ac.cn<br>贾立 I-1457-2014, 中国科学院空天信息创新研究院, jiali@aircas.ac.cn   |
| 地理区域      | 中国西南地区: 21°9'N–34°19'N, 97°20'E–112°2'E   |
| 数据年代      | 1951–2016   |
| 时间分辨率     | 1 月、8 天   |
| 空间分辨率     | 0.5°  |
| 数据格式      | .tif、.xls   |
| 数据量       | 98 KB   |
| 数据集组成     | (1) scPDSI(1951-2016)_CCI-SoilMoisture(2007-2016)_SW_China (表 1: 1951–2016 年历年月度 scPDSI 干旱指数数据)<br>(2) scPDSI(1951-2016)_CCI-SoilMoisture(2007-2016)_SW_China (表 2: 2007–2016 年间 8 天频率主动微波遥感土壤湿度百分比数据)<br>(3) scPDSI_1951-2016_interannual_slope_SW_China (2007–2016 年间 8 天频率标准化 CCI 土壤湿度时间序列数据)  |
| 基金项目      | 中华人民共和国科学技术部 (2017YFD0300402); 国家自然科学基金 (41701495)  |
| 数据计算环境    | ArcGIS 中国科学院空天信息创新研究院院内平台   |
| 出版与共享服务平台 | 全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>  |
| 地址        | 北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所   |
| 数据共享政策    | 全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据 (中英文)、通过《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》发表的实体数据和通过《全球变化数据学报 (中英文)》发表的数据论文。其共享政策如下: (1) “数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载; (2) 最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源; (3) 增值服务用户或以任何形式散发和传播 (包括通过计算机服务器) “数据”的用户需要与《全球变化数据学报 (中英文)》编辑部签署书面协议, 获得许可; (4) 摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[4]</sup> |
| 数据和论文检索系统 | DOI, DCI, CSDC, WDS/ISC, GEOSS, China GEOSS, Crossref   |

scPDSI的水量平衡模型所需输入的降水和潜在蒸散发数据主要来自全球月平均地表气候要素格点数据集 (CRU TS 3.25 数据版本)<sup>[6]</sup>, 其中潜在蒸散发基于同时考虑气温和辐射影响的 Penman-Monteith 公式进行估算, 物理机制较为完善。CRU scPDSI 数据集对于气候干湿程度变化具有良好的响应能力, 已应用于美国气象学会每年发布的“State of the Climate”中关于全球干旱状况的监测评估<sup>[7]</sup>。CRU TS 地表气候要素格点数据集主要基于台站观测数据进行插值得到, 由于中国覆盖比较完整的台站观测始于 1950 年代初期, 所以研究中使用 1951–2016 年的 CRU scPDSI 数据进行线性趋势分析, 在此基础上可以分析中

国西南地区干湿程度变化特征。

ESA CCI (European Space Agency Climate Change Initiative) 微波遥感反演土壤湿度数据是国际上主要的多源融合表层土壤湿度数据产品<sup>[8]</sup>, 包括主动微波遥感反演融合土壤湿度数据、被动微波遥感反演融合土壤湿度数据, 以及同时利用主动和被动微波遥感反演的多源融合土壤湿度数据等三种数据产品。V4.2 版本的 ESA CCI 土壤湿度数据时空分辨率为  $0.25^{\circ}\cdot\text{d}^{-1}$ , 时间范围为 1979–2016 年。对于气候湿润并且植被覆盖较为茂密的中国西南地区, 主动微波遥感反演土壤湿度数据明显优于被动微波遥感反演土壤湿度数据, 并且被动微波遥感反演土壤湿度在中国西南地区存在较多的空缺值, 因此本研究采用 ESA CCI 主动微波遥感反演融合土壤湿度数据(融合 ASCAT 遥感数据之后的 2007 年以来的 CCI 数据) 并对其进行标准化处理, 在此基础上可以分析表层土壤湿度对于气候干湿程度变化的响应特征。

3.2 技术路线

利用 1951–2016 年中国西南地区逐年 (每年 12 个月平均值) 自适应帕尔默干旱指数 scPDSI 进行线性趋势分析, 基于最小二乘法得到其近 66 年来的干湿程度变化趋势, 即 scPDSI 年际变化率。其中线性趋势大于 0 表示 scPDSI 逐渐增加, 气候趋于湿润化, 数值越大表明相对湿润化程度越高。干湿程度线性变化趋势小于 0 表示 scPDSI 逐渐减小, 气候趋于干旱化, 数值越小表明相对干旱化程度越严重。

ESA CCI 主动微波遥感反演融合土壤湿度数据无量纲, 数值范围为 0% –100%, 为了对 scPDSI 和 ESA CCI 土壤湿度进行比较, 对 ESA CCI 土壤湿度进行标准化处理, 使其与 scPDSI 具有相同的数值范围。

$$SM - S_i = \frac{SM_i - SM_{Mean}}{\sigma}$$

(1)

式中,  $SM - S_i$  (无量纲) 为标准化后的 ESA CCI 土壤湿度 ( $i$  为 2007, 2008, …, 2016),  $SM_i$  为原始 ESA CCI 土壤湿度 (%),  $SM_{Mean}$  为 2007–2016 年多年平均土壤湿度 (%),  $\sigma$  为  $SM_i$  时间序列的标准偏差 (%)。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

《中国西南地区历年月度干旱指数（1951–2016）和 8 天频率土壤湿度（2007–2016）》

表 2 scPDSI 指数对应的干湿状况

| scPDSI | 干湿状况 |
|--------|------|
| > 4    | 极端湿润 |
| 3–4    | 重度湿润 |
| 2–3    | 中等湿润 |
| 1–2    | 轻微湿润 |
| –1–1   | 基本正常 |
| –2– –1 | 轻旱   |
| –3– –2 | 中旱   |
| –4– –3 | 重旱   |
| < –4   | 特旱   |

数据集由下列数据组成：

- (1) 1951–2016 年历年月度 scPDSI 干旱指数数据；
- (2) 2007–2016 年间 8 天频率主动微波遥感土壤湿度百分比数据；
- (3) 2007–2016 年间 8 天频率标准化 CCI 土壤湿度时间序列数据。

数据集由 2 个文件组成，分别存储为.xls和.tif 数据格式，.tif 数据的空间分辨率为 0.5°。数据量为 98 KB（压缩为 1 个文件，压缩后数据量为 31.7 KB）。

4.2 数据结果

4.2.1 西南地区干湿程度年际变化及土壤湿度响应特征

1951–2016 年中国西南地区自适应帕尔默干旱指数 scPDSI 年际变化趋势空间分布特征如图 1 所示。从图 1 中可以看出，近 66 年来西南地区大部分处于干旱化的趋势，其中西南地区中部的四川、贵州、云南三省交界地区干旱化趋势最为明显。四川西北部青藏高原地区呈现出湿润化的变化趋势。

对 1951–2016 年中国西南地区每年的自适应帕尔默干旱指数 scPDSI 进行区域平均统计，其时间序列变化特征如图 2 所示。在 20 世纪下半叶，西南地区气候干湿交替变化，但整体年际变化趋势较为平缓。21 世纪以来，气候干旱化趋势异常明显，尤其是 2005–2007 年、2009–2013 年出现长时间极端干旱天气过程，主要是由于西南地区缺少南北气流的交汇，并且主要水汽来源地——孟加拉湾和南海向西南地区的水汽输送偏弱。此外，干旱发生时对应的西南地区上空为深厚的异常下沉气流，缺乏形成降水的上升运动条件，干旱得以持续蔓延。

1951–2016 年共发生 3 次超强厄尔尼诺事件，分别为 1982 年 4 月–1983 年 6 月、1997 年 4 月–1998 年 4 月、2014 年 10 月–2016 年 4 月。对于中国西南地区，1983 年和 2016 年气候极端湿润，而 1998 年接近常年平均水平。在最近一次的超强厄尔尼诺事件及其结束后一段时期的持续影响下，2015、2016 年西南地区降水显著偏多，其中 2016 年降水量

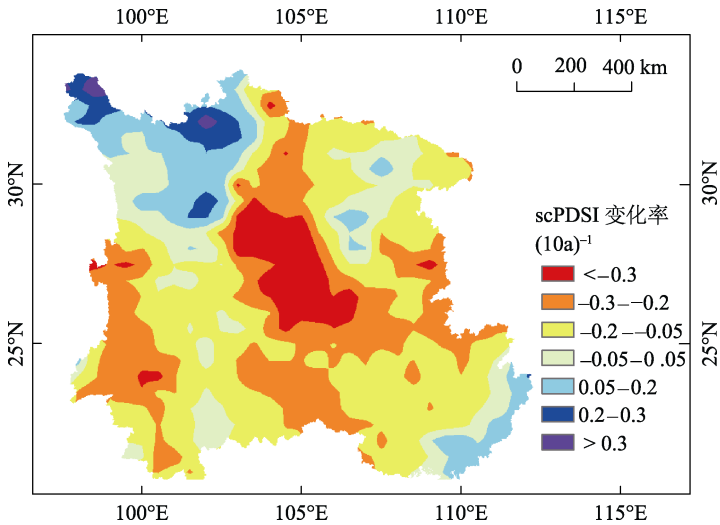


图 1 1951–2016 年西南地区 scPDSI 干湿程度年际变化趋势空间分布

为近 66 年来最高，气候极端湿润，scPDSI 突破历史极值。需要指出的是，1968 年西南地区 scPDSI 仅次于 2016 年，气候极端湿润，但当年及其前一年并未发生明显的厄尔尼诺事件。

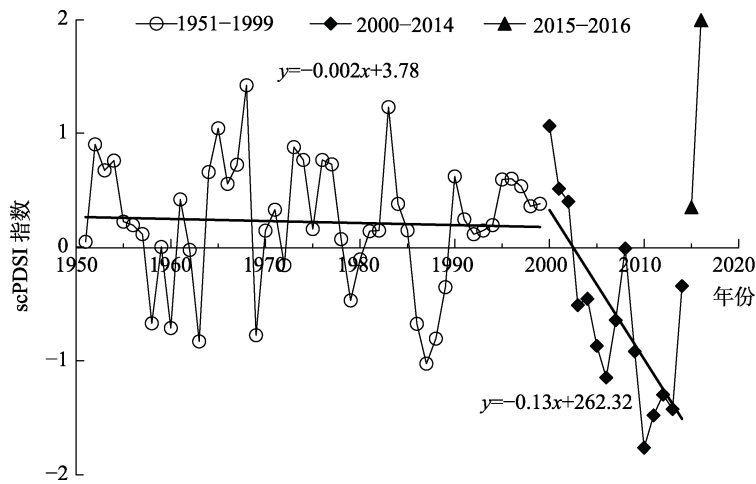


图 2 1951–2016 年西南地区 scPDSI 时间序列变化

对 2007–2016 年中国西南地区自适应帕尔默干旱指数 scPDSI 及标准化处理后的 ESA CCI 土壤湿度进行区域平均统计，其年际变化特征如图 3 所示。scPDSI 与标准化 CCI 土壤湿度之间整体变化趋势较为一致，均反映出由前期的干旱气候转为后期的湿润气候。由于自适应帕尔默干旱指数 scPDSI 所表征的时间尺度通常是 9–12 个月，所以年际变化较为平缓且滞后，而 CCI 表层土壤湿度变化则较为敏感。对于 2009 年秋至 2010 年春的西南地区干旱事件，scPDSI 反映出 2010 年最为干旱，而在标准化 CCI 土壤湿度上的反映并不明显，其细节变化将通过下一节的气候变化来分析。

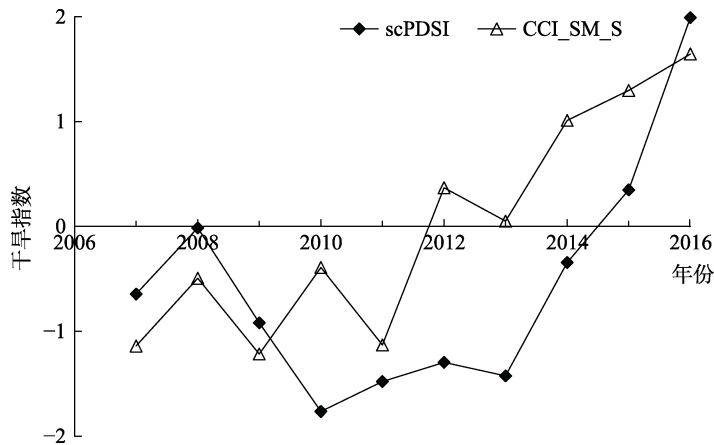


图 3 2007–2016 年西南地区 scPDSI 及标准化 CCI 土壤湿度时间序列变化

4.2.2 西南地区干湿程度季节变化及土壤湿度响应特征

对气候干旱的 2009–2011 年和气候湿润的 2014–2016 年中国西南地区 scPDSI(月尺度) 及标准化 CCI 土壤湿度(8d 平均) 进行区域平均统计, 其季节变化特征如图 4、图 5 所示, 其中在进行标准化时采用的 CCI 土壤湿度(8d 平均) 多年平均值为一年当中的某一时段在 2007–2016 年的平均值。在 2009–2011 年, scPDSI 反映出两次极端干旱事件, 分别为 2009 年秋至 2010 年春以及 2011 年夏季, 而相应时段的 CCI 土壤湿度均明显低于多年平均值, 标准化 CCI 土壤湿度最小值达到-2, 波谷形态与 scPDSI 较为一致。2010 年下半年干旱有所缓解, scPDSI 缓慢升高, 而标准化 CCI 土壤湿度则快速升高到 0 附近, 主要是由二者表征的干旱尺度不同决定的。对于干旱而言, 其显著特征是具有多尺度现象。自适应帕尔默干旱指数 scPDSI 所表征的干旱尺度通常是 9–12 个月, 能够反映中长期的水文干旱, 而标准化 CCI 土壤湿度反映的是短期的气象干旱和农业干旱。

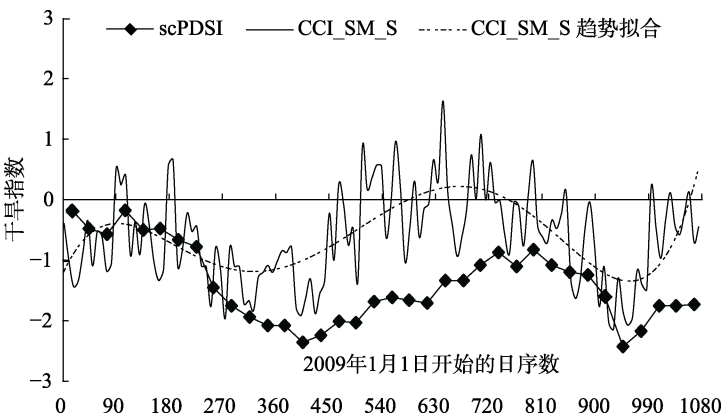


图 4 2009–2011 年西南地区 scPDSI 及标准化 CCI 土壤湿度季节变化

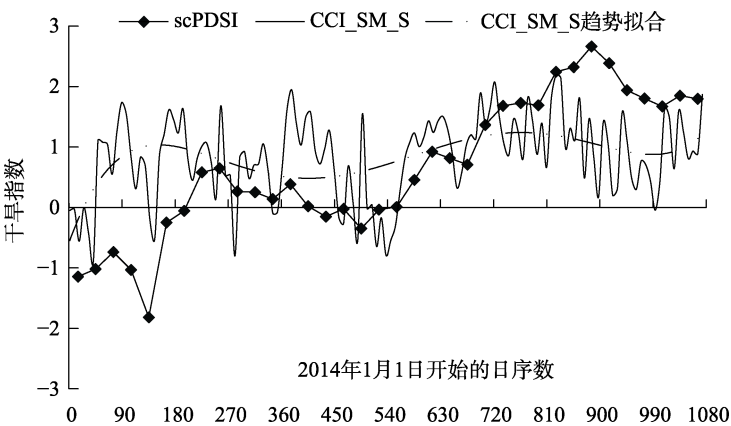


图 5 2014–2016 年西南地区 scPDSI 及标准化 CCI 土壤湿度季节变化

在超强厄尔尼诺事件发生的 2014–2016 年, scPDSI 逐渐由负转正, 气候逐渐湿润化, 并且在 2015 年夏季至 2016 年气候明显湿润, 而相应时段的 CCI 土壤湿度均明显高于多年

平均值, 标准化 CCI 土壤湿度大于 0。因此, CCI 主动微波遥感反演融合土壤湿度能够较好反映气候干湿程度变化, 也实现了对大尺度粗分辨率微波遥感反演土壤湿度的间接验证。需要说明的是, 标准化 CCI 土壤湿度对于极端降水事件的响应不够敏感, 在 2016 年夏季的波峰形态低于 scPDSI 的波峰, 主要是由于发生极端降水事件时大量的降水形成地表径流或入渗补给深层地下水, 因而表层土壤水分的变化较为平缓。

### 4.3 数据结果验证

利用 1961–2011 年中国西南地区气象站观测数据计算得到的干湿指数表明近 50 年来西南地区的气候有“暖干化”的变化趋势, 并且 21 世纪以来有进一步加剧的趋势<sup>[9–10]</sup>, 与自适应帕尔默干旱指数 scPDSI 所反映的气候干湿状况变化特征相一致。此外, 全球陆面数据同化系统 (Global Land Data Assimilation System, GLDAS) 陆面模式 Noah 模拟的土壤湿度与降水、气温的相关分析表明中国西南地区表层土壤湿度与气温的相关性高于降水, 1979–2017 年西南地区年降水量呈不显著增加趋势, 年平均气温呈显著增加趋势 (潜在蒸散发增加), 而表层土壤湿度呈显著减少趋势<sup>[11]</sup>, GLDAS 表层土壤湿度对于西南地区暖干化的气候变化特征具有良好的响应能力, 与 CCI 遥感反演表层土壤湿度对于气候变化的响应相一致。

## 5 讨论和总结

自适应帕尔默干旱指数 scPDSI 对于全球气候显著变暖背景下 1951–2016 年中国西南地区的气候干湿程度变化具有良好的响应能力。scPDSI 通常是基于气象数据建立的, 随着遥感反演与台站观测相融合得到的降水产品时间序列逐渐延长累积, 已可应用于基于降水的干旱指标的建立<sup>[12]</sup>。此外, 利用可见光、红外等多源遥感数据建立的植被健康指数 (Vegetation Health Index, VHI)、归一化干旱异常指数 (Normalized Drought Anomaly Index, NDAI) 等相关监测指标通常具有更高的空间分辨率并且能够间接反映地表干湿状况变化过程<sup>[13–14]</sup>。

本文基于 1951–2016 年中国西南地区自适应帕尔默干旱指数 scPDSI 以及 2007–2016 年 ESA CCI 土壤湿度数据分析该区域在全球气候显著变暖背景下的干湿程度变化特征以及表层土壤湿度的响应特征, 主要结论如下:

(1) 自适应帕尔默干旱指数 scPDSI 综合考虑了降水和蒸散发这两个影响水分盈亏状况的因素, 对于全球气候变暖背景下中国西南地区的气候干湿程度变化具有良好的响应能力, 而主动微波遥感反演土壤湿度能够较好反映气候干湿程度变化, 尤其是对于干旱事件的响应比极端降水事件的响应更为敏感, 也实现了对大尺度粗分辨率微波遥感反演土壤湿度的间接验证。

(2) 西南地区大部分处于干旱化的趋势, 尤其是 21 世纪以来气候干旱化趋势异常明显, 2005–2007 年、2009–2013 年出现长时间极端干旱天气过程。

(3) 在全球气候显著变暖背景下, 近年来西南地区极端气候事件频发, 2010 年和 2016 年分别为近 66 年来最为干旱的一年和最为湿润的一年, 需要进一步提高对西南地区极端干旱和极端降水的监测水平和预测能力。



**作者分工：**贾立对数据集的开发做了总体设计；周杰和卢静采集和处理了干旱指数和土壤湿度数据；胡光成和郑超磊进行了数据分析；贾立和胡光成撰写了数据论文。

## 参考文献

- [1] Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696–1718.
- [2] Wells, N., Goddard, S., Hayes, M. J. A self-calibrating palmer drought severity index [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(12): 2335–2351.
- [3] 胡光成, 周杰, 卢静等. 中国西南地区历年月度干旱指数 (1951–2016) 和 8 天频率土壤湿度 (2007–2016) 数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.04.17.V1>.
- [4] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy>. 2014.05 (2017 年更新).
- [5] van der Schrier, G., Barichivich, J., Briffa, K. R., *et al.* A scPDSI-based global data set of dry and wet spells for 1901–2009 [J]. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 2013, 118(10): 4025–4048.
- [6] Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., *et al.* Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 dataset [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3): 623–642.
- [7] Osborn, T. J., Barichivich, J., Harris, I., *et al.* Monitoring global drought using the self-calibrating Palmer Drought Severity Index [in “State of the Climate in 2016”] [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(8): S32–S33.
- [8] Liu, Y. Y., Dorigo, W. A., Parinussa, R. M., *et al.* Trend-preserving blending of passive and active microwave soil moisture retrievals [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 280–297.
- [9] 苏秀程, 王磊, 李奇临等. 近 50a 中国西南地区地表干湿状况研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 104–116.
- [10] 王允, 刘普幸, 曹立国等. 基于湿润指数的 1960–2011 年中国西南地区地表干湿变化特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(5): 830–838.
- [11] 邓元红, 王世杰, 白晓永等. 西南地区土壤湿度与气候之间的互馈效应[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8688–8699.
- [12] Lu, J., Jia, L., Menenti, M., *et al.* Performance of the standardized precipitation index based on the TMPA and CMORPH precipitation products for drought monitoring in China [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(5): 1387–1396.
- [13] Jia, L., Hu, G. C., Zhou, J., *et al.* Assessing the sensitivity of two new indicators of vegetation response to water availability for drought monitoring [C]. Entekhabi, D., Honda, Y., Sawada, H., *et al.* (eds.). *Proceedings of SPIE Vol. 8524 (Land Surface Remote Sensing)*. Bellingham: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2012: 85241A.
- [14] van Hoek, M., Zhou, J., Jia, L., *et al.* A prototype web-based analysis platform for drought monitoring and early warning [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2020, 13(7): 817–831.