多情景融合方法预测全球干旱实验数据集（2015–2100）研发与分析

崔竞文[1,2]，刘杨晓月[1*]，席永士[3]，赵贯锋[4]

1. 中国科学院地理科学与资源研究所，北京 100101；
2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 西藏自治区农畜产品质量安全检验检测中心，拉萨 850000；
4. 西藏自治区农业技术推广服务中心，拉萨 850000

摘 要：全球气候变化正加剧干旱的发生频率、波及范围与严重程度，使其成为危及自然生态与人类社会稳定的突出环境挑战。为建立一套可靠的全球多情景未来干旱预测数据集，本研究选用 CMIP6（Coupled Model Intercomparison Project Phase 6）中的 18 套地球系统模式，选取降水量（Precipitation, mm/month）、土壤上层含水量（Moisture in upper portion of soil column, % volumetric）、近地表气温（Near-surface air temperature, ℃）及潜在蒸散量（Potential Evapotranspiration, PET, mm/month）四类核心气候变量，并在统一时空分辨率的基础上，计算得到 4 种典型干旱指数：标准化降水蒸散指数（Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI）、干旱严重度指数（Drought Severity Index, DSI）、温度状况指数（Temperature Condition Index, TCI）与标准化土壤湿度指数（Standardized Soil Moisture Index, SSMI）。通过选取 5 次典型重大干旱事件对各指数的预测能力加以验证，发现 DSI 与 SSMI 在刻画干旱强度及其空间分布方面效果最优，可较好地再现未来干旱的时空演变规律。就数值含义而言，SPEI、SSMI 与 DSI 的取值越低，表示干旱越严重，其中低于−1.0、−1.5 和−2.0 分别表示至少中度干旱、至少重度干旱和极端干旱；TCI 取值越低，则表明热胁迫越强（<50%为高热胁迫）。数据集内容包含基于 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景预测的 2015−2100 年每月 4 种代表性干旱指数值，空间分辨率为 0.5°。数据集存储为.tif 格式，由 16,512 个数据文件组成，数据量为 7.45 GB（压缩为 8 个文件，4.86 GB）。

关键词：干旱预测；未来多情景；干旱指数；全球；融合

DOI: https://doi.org/10.3974/geodp.2026.05.05

CSTR: https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2026.05.05.

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.2026.05.02.V1 或 https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2026.05.02.V1.

收稿日期：2026-04-01；**修订日期**：2026-09-27；**出版日期**：2026-10-25

基金项目：国家自然科学基金（42571539）

***通讯作者**：刘杨晓月，中国科学院地理科学与资源研究所，lyxy@lreis.ac.cn

数据引用方式：[1] 崔竞文，刘杨晓月，席永士等. 多情景融合方法预测全球干旱实验数据集（2015–2100）研发与分析[J]. 全球变化数据学报，2026，10(5)：553–561. https://doi.org/10.3974/geodp.2026.05.05. https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2026.05.05.

[2] 崔竞文，刘杨晓月，席永士等. 多情景融合方法预测全球干旱实验数据集（2015–2100）[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志，2026. https://doi.org/10.3974/geodb.2026.05.02.V1. https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2026.05.02.V1.

1 前言

干旱作为一种典型的自然灾害，在全球气候变化背景下呈现出频率升高、范围扩大和强度增强等趋势，已成为影响生态系统健康、农业生产、水资源安全和区域社会经济可持续发展的重要气候风险因素[1–3]。随着全球变暖的加剧，气温持续上升与降水时空格局变化相互交织，使得干旱事件的发生更具复杂性与不确定性，对干旱的科学评估和精准监测提出了更高的要求[4]。

为了更全面地表征干旱的演变过程与多维影响，学术界发展了多种干旱指数，广泛应用于干旱识别、监测与风险评估。其中，标准化降水蒸散指数（Standardized Precipitation Evapotranspiration Index，SPEI）、干旱严重度指数（Drought Severity Index，DSI）、温度状况指数（Temperature Condition Index，TCI）以及标准化土壤湿度指数（Standardized Soil Moisture Index，SSMI）具有代表性。SPEI 融合了降水与潜在蒸散发的影响，因而对温度变化对水分平衡的影响更为敏感[5]；SSMI 主要评估土壤湿度亏缺，常被视为衡量农业干旱的重要指标[6]；TCI 基于遥感地表温度（Land Surface Temperature，LST）数据，评估植被热胁迫，适用于大范围和高频次的干旱监测[7]；DSI 则能更全面地反映干旱事件中生态与水文响应。这四种指数各具优势，联合使用可提高干旱识别的时效性与准确性，增强对不同干旱类型的响应能力。

近年来，第六阶段耦合模式比较计划（Coupled Model Intercomparison Project Phase 6，CMIP6）为干旱监测研究提供了丰富的气候模拟数据[8,9]。相较于传统观测与再分析数据集（如 ERA5、CRU、GPCC 等），CMIP6 具有全球覆盖范围广、时间跨度长、变量丰富、情景设置科学等优势，能够提供多种社会经济发展路径下的气候预测结果。CMIP6 中的共享社会经济路径（SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5）覆盖了从低排放到高排放的多种未来情景，适用于开展多方案对比下的干旱风险分析。

尽管干旱指数和 CMIP6 数据在各类研究中已有广泛应用，但目前仍缺乏将多源干旱指数与 CMIP6 多情景气候数据系统融合的全球干旱监测数据集。这在一定程度上限制了干旱指数之间的交叉比较、不同区域间的风险评估，以及对未来气候变化情景下干旱趋势的多角度分析与综合判断。因此，本研究基于 SPEI、DSI、TCI 与 SSMI 四种干旱指数，结合 CMIP6 历史模拟及未来气候情景数据，构建了一个具有全球覆盖、多时空尺度、统一处理流程的数据集，旨在为气候变化背景下的干旱时空演变研究、风险评估与决策支持提供高质量的基础数据产品。该数据集的发布将为全球干旱监测研究提供数据支撑，也为极端气候响应研究和区域气候适应策略制定提供重要参考。

2 数据集元数据简介

《多情景融合方法预测全球干旱实验数据集（2015–2100）》[10]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。

表 1　《多情景融合方法预测全球干旱实验数据集（2015–2100）》元数据简表

条　目	描　述
数据集名称	多情景融合方法预测全球干旱实验数据集（2015–2100）
数据集短名	GlobalDrought_2015-2100
作者信息	崔竞文，中国科学院地理科学与资源研究所，中国科学院大学，jingwencui99@gmail.com 刘杨晓月，中国科学院地理科学与资源研究所，lyxy@lreis.ac.cn 席永士，西藏自治区农畜产品质量安全检验检测中心，yongshi.x@163.com 赵贯锋，西藏自治区农业技术推广服务中心，284470203@qq.com
地理区域	全球（90°N–60°S）
数据年代	2015–2100 年
时间分辨率	月
空间分辨率	0.5°×0.5°
数据格式	.tif
数据量	7.45 GB
数据集组成	基于 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景预测的 2015–2100 年每月 4 种代表性干旱指数值
基金项目	国家自然科学基金（42571539）；中华人民共和国科学技术部（2022YFF0711603）
数据计算环境	Python 3.10
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统
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	（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[11]
数据和论文检索系统	DOI，CSTR，Crossref，DCI，CSCD，CNKI，SciEngine，WDS，GEOSS，PubScholar，CKRSC，OARL

3　数据研发方法

3.1　数据来源

本研究在 4 种共享社会经济路径情景（SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5）下，基于 18 套 CMIP6 模式选取 4 类关键变量用于干旱指数计算，并区分不同变量对应的模式来源。其中降水量（Precipitation，mm/month）、土壤上层含水量（Moisture in upper portion of soil column，% volumetric）与近地表气温（Near-surface air temperature，℃）三类变量由以下 16 个模式提供：ACCESS-CM2（澳大利亚联邦科学与工业研究组织）、BCC-CSM2-MR（中国气象局北京气候中心）、CAMS-CSM1-0（中国气象科学研究院）、CanESM5-CanOE（加拿大气候模拟与分析中心）、CESM2（美国国家大气研究中心）、CMCC-CM2-SR5（意大利欧洲—地中海气候变化中心）、CNRM-CM6-1-HR（法国国家气象研究中心）、CNRM-ESM2-1（法国国家气象研究中心）、KACE-1-0-G（韩国气象厅国立气象科学院）、MIROC6（日本海洋研究开发机构）、MIROC-ES2L（日本海洋研究开发机

构）、MPI-ESM1-2-LR（德国马克斯·普朗克气象研究所）、MRI-ESM2-0（日本气象研究所）、NorESM2-MM（挪威气候中心）、TaiESM1（中国台湾中央研究院）和 UKESM1-0-LL（英国气象局哈德利中心）；而潜在蒸散发（Potential Evapotranspiration, PET，mm/month）则由 CNRM-CM6-1（法国国家气象研究中心）、IPSL-CM6A-LR（法国皮埃尔·西蒙·拉普拉斯研究所）和 CNRM-ESM2-1（法国国家气象研究中心）提供。所有数据统一至 0.5°×0.5°空间分辨率与月尺度时间分辨率，以确保不同模式与变量间的可比性。

3.2 技术路线

为获取稳定可靠的 CMIP6 全球干旱预测数据产品，本研究首先对原始栅格数据进行预处理，将其统一转换为 TIFF 格式，并在空间上重采样至 0.5°×0.5°分辨率、在时间上归并至月尺度；为提高变量稳定性，对各变量按像元在可用模式上取平均，并设定最小有效模式数阈值（16 模型变量取 8，3 模型变量取 2），未达阈值的像元记为 NoData（–9999）；第二，计算四种干旱指数，并依据指数结果划分相应的干旱等级；第三，利用已报道的典型干旱严重事件对四种干旱指数的干旱预测准确性进行验证。

3.3 干旱指数计算

本研究计算了四种干旱指数，包括 SPEI、SSMI、TCI 和 DSI。

3.3.1 SPEI 计算

$$S = P - PET \tag{1}$$

式中，S 表示水分平衡值（单位：mm/month），P 表示降水量（单位：mm/month），PET 表示潜在蒸散量（单位：mm/month）。

$$S_{cumul} = \sum_{i=1}^{n} S_i \tag{2}$$

式中，S_{cumul} 表示所选时间尺度内的累积水分平衡值（mm/month），n 表示时间尺度（例如，n=3 表示 3 个月），S_i 表示第 i 个月的水分平衡值（mm/month）。

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}\left[1+\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2} \tag{3}$$

式中，$f(x)$表示累积水分平衡值的概率密度函数，x 表示累积水分平衡值（单位：mm/month），α、β 和 γ 分别表示尺度参数（单位：mm/month）、形状参数（无量纲）和位置参数（单位：mm/month），这些参数通过极大似然估计方法获得。

$$F(x) = \left[1+\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-1} \tag{4}$$

式中，$F(x)$ 表示给定累积水分平衡值 Scumul 的累积概率（无量纲）。

$$SPEI = \Phi^{-1}\left(F(x)\right) \tag{5}$$

式中，Φ^{-1} 表示标准正态分布的反函数（probit 函数），$SPEI$ 值服从均值为 0、标准差为 1 的标准正态分布。根据以下阈值对 $SPEI$ 值进行分类，以判断干旱或湿润程度。$SPEI$ 值的解释依据表 2 中的分类标准。

表 2　基于 SPEI 值的干旱和湿润程度分类

SPEI 值	类别	SPEI 值	类别
SPEI > 2.0	极湿	–1.5 ≤ SPEI < –1.0	中度干旱
1.5 <SPEI ≤ 2.0	很湿	–2.0 ≤ SPEI < –1.5	重度干旱
1.0 < SPEI ≤ 1.5	偏湿	SPEI < –2.0	极端干旱
–1.0 ≤ SPEI ≤ 1.0	正常		

3.3.2　SSMI 计算

$$SSMI = \frac{X - \mu}{\sigma} \tag{6}$$

式中，X 表示某一时间步的土壤湿度值（单位：%），μ 表示整个时间序列的平均值（单位：%），σ 表示整个时间序列的标准差（单位：%）。μ、σ 计算公式如下：

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i \tag{7}$$

式中，N 表示时间步长的总数（无量纲），X_i 表示第 i 个时间步的土壤湿度值（单位：%）。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(X_i - \mu\right)^2} \tag{8}$$

SSMI 值的解释见表 3。

表 3　基于 SSMI 值的干旱和湿润程度分类

SSMI 值	类别	SSMI 值	类别
SSMI > 2.0	极湿	–1.5 ≤ SSMI < –1.0	中度干旱
1.5 < SSMI ≤ 2.0	很湿	–2.0 ≤ SSMI < –1.5	重度干旱
1.0 < SSMI ≤ 1.5	偏湿	SSMI < –2.0	极端干旱
–1.0 ≤ SSMI ≤ 1.0	正常		

3.3.3　TCI 计算

TCI 是一种基于陆表温度（LST）的广泛应用的干旱指标，用于量化特定区域植被所承受的热胁迫水平。TCI 反映了当前地表温度在其历史范围内的相对位置，从而为评估热胁迫对植被的影响提供了重要信息。

$$TCI = \frac{T_{max} - T_i}{T_{max} - T_{min}} \times 100\% \tag{9}$$

式中，T_i 表示第 i 时刻的 LST（单位：℃），T_{max} 和 T_{min} 分别为研究期内的最大与最小 LST（单位：℃）。

TCI 值范围在 0%–100%，能够直接反映植被热胁迫程度：当 $TCI \geqslant 50\%$ 时，说明当前温度接近历史最低值，热胁迫较低，有利于植被生长；当 $TCI < 50\%$ 时，说明当前温度接近历史最高值，反映出严重热胁迫，可能抑制植被生长。

3.3.4 DSI 计算

$$X = P - PET \tag{10}$$

式中，X 表示水分平衡值（单位：mm/month），P 表示降水量（单位：mm/month），PET 表示潜在蒸散量（单位：mm/month）。该指标反映了在考虑蒸散损失后，系统中可利用的净水量。

$$DSI = \frac{X - \mu}{\sigma} \tag{11}$$

式中，X 表示当前的水分平衡值（单位：mm/month），μ 为该变量的长期平均值（单位：mm/month），σ 为该变量的长期标准差（单位：mm/month）。表 4 给出了基于 DSI 值的干旱和湿润程度分类。

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i \tag{12}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(X_i - \mu\right)^2} \tag{13}$$

表 4 基于 DSI 值的干旱和湿润程度分类

DSI 值	类别	DSI 值	类别
$DSI \leqslant -2.0$	极端干旱	$-1.0 < DSI \leqslant 1.0$	正常状态
$-2.0 < DSI \leqslant -1.5$	重度干旱	$DSI > 1.0$	湿润状态
$-1.5 < DSI \leqslant -1.0$	中度干旱		

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据集内容包括：基于 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5 情景和四种干旱指数计算预测的 2015–2100 年每月的全球干旱数据，空间分辨率为 0.5°，文件命名方式为 ssp126_yyyy.mm_DSI.tif。

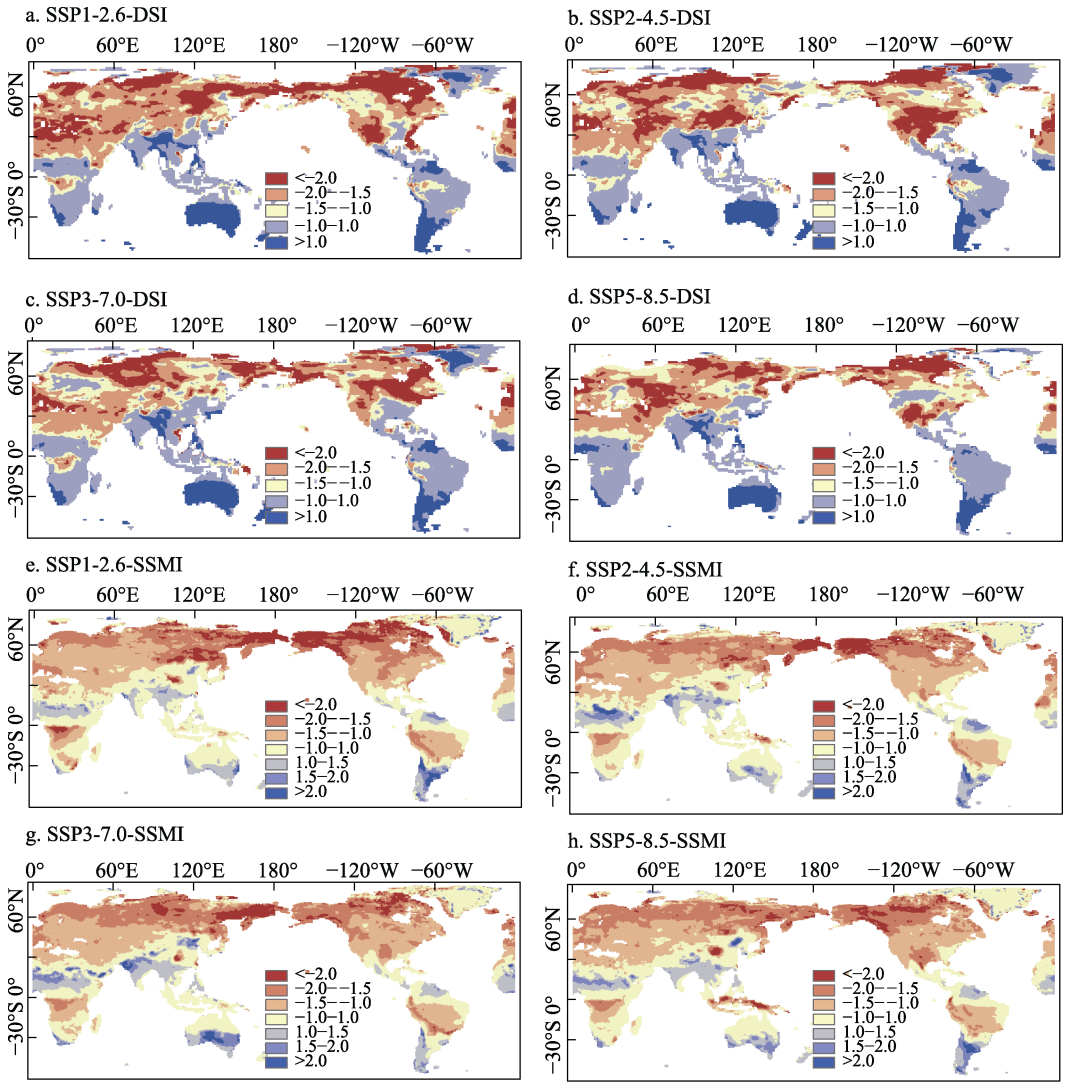
4.2 数据结果验证

本研究选用了近年来引起全球广泛关注的 5 次重大干旱事件，包括 2022 年欧洲的严重干旱、2020–2023 年非洲之角的持续干旱、自 2010 年以来智利中部的“超级干旱”、2022 年美国西部的历史性干旱，以及 2022 年中国南方的极端干旱。基于四种共享社会经济路径（SSP）情景，本研究采用 SPEI、TCI、DSI 和 SSMI 四种干旱指数对这些事件进行了综合分析。分析结果显示，四种干旱指数在表现上存在显著差异。与 SPEI 和 TCI 相比，DSI 和 SSMI 在识别重大干旱的严重程度及其空间范围方面表现更优。SPEI 能够识别从正常到极端的不同干旱等级，但往往低估实际的干旱强度及影响范围。TCI 通过近地表温度评估热胁迫，但未考虑降水、土壤湿度等关键水文因子，其分类方法也较为简单，仅包括“高”与“低”两种热胁迫等级，因此在识别复杂或复合型干旱时效果较差。相比之下，DSI 和 SSMI 的结果更加稳定且精确。在这些案例中，DSI 和 SSMI 的评估结果与实地观测数据及

媒体报道高度一致，表明其具有更好的现实适用性。这些发现强调了在气候变化背景下选择合适干旱指数的重要性。DSI 和 SSMI 在不同区域及不同排放情景下均表现出一致的性能，因此建议将其作为全球干旱监测的核心工具。采用这两种指数有助于提升干旱风险管理水平，并支持地方响应策略的制定。

4.3 数据结果分析

图 1 为 CMIP6 在 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5 四种共享社会经济路径模式下不同干旱指数计算得出的全球干旱预测数据，以 2030 年 7 月的数据作为 CMIP6 全球干旱预测产品的样例。从图 1 可以看出，在同一干旱指数下，2030 年 7 月四种 SSP 情景的全球空间分布总体较为相似，但部分区域的干旱等级存在一定差异。不同干旱指数之间的空间表征差异相对更加明显，其中 DSI 和 SSMI 呈现出较清晰的区域空间分异，SPEI 整体变化相对平缓，TCI 则表现为较为概括的高、低热胁迫空间分布。该样例直观展示了本数据集在不同情景和不同干旱指数下的全球空间信息特征。



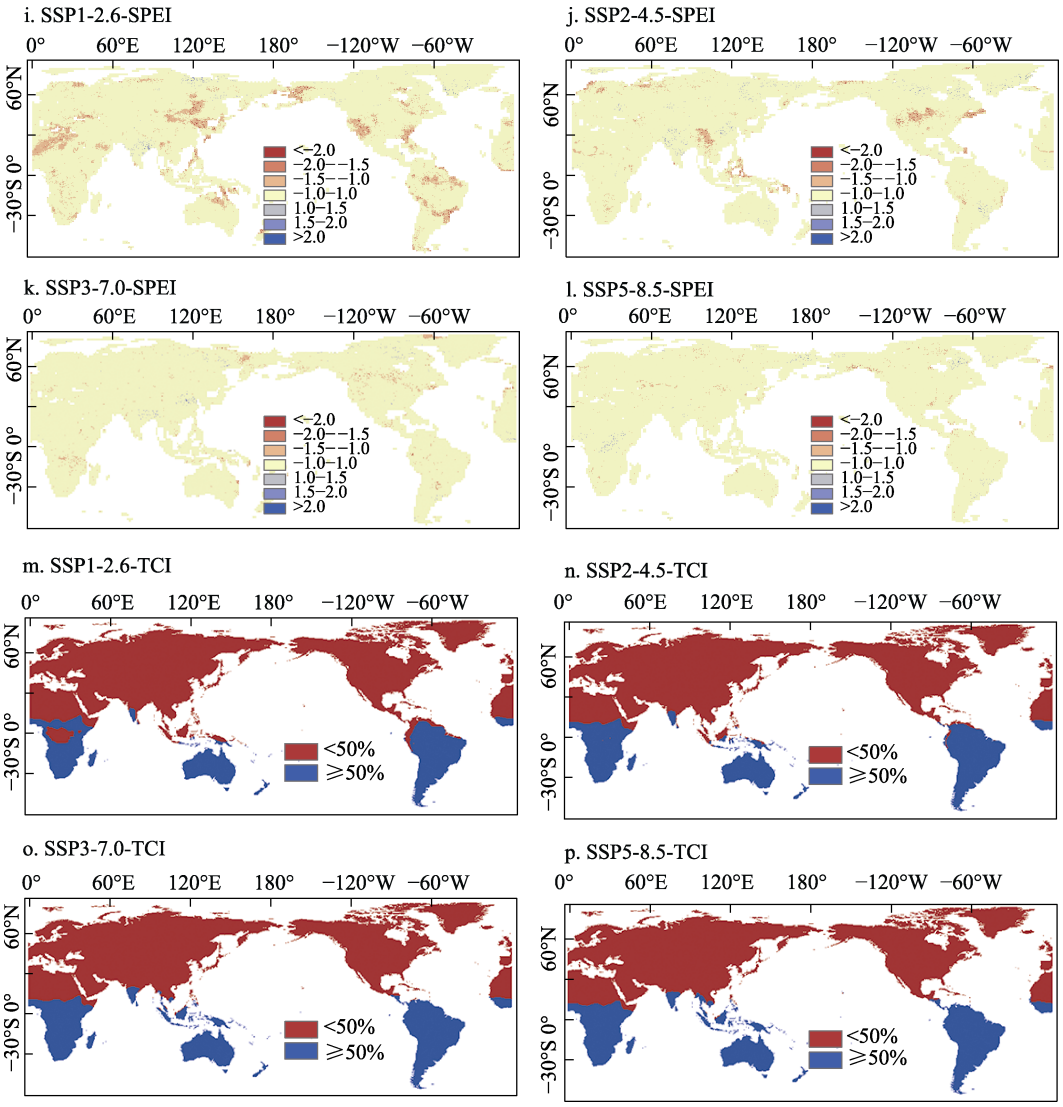


图 1 不同模式下四种干旱指数全球干旱预测数据（2030 年 7 月）

（该图基于审图号为 GS（2016）2948 号的标准地图制作，底图无修改）

5 讨论和结果

干旱已成为全球亟待应对的重大气候与环境问题，深入开展干旱研究对提升风险预警能力、保障生态与社会可持续发展具有重要意义。获取长时序、质量可靠的全球干旱数据，是理解干旱格局的关键支撑。在全球气候变化背景下，构建质量可靠的未来情景全球干旱数据集，则是准确研判干旱时空分布演化特征的必要前提。本研究从数据融合的角度出发，在 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5 情景和四种干旱指数计算基础上，结合多套 CMIP6 模型的气候输出数据，最终形成 2015–2100 年全球月尺度 0.5°×0.5°分辨率地表全球干旱预测数据集。经 5 次重大干旱事件验证，DSI 和 SSMI 在识别重大干旱的严重程度及

其空间范围方面表现更优，表明该数据能够有效的预测未来全球干旱的时空演变特征及变化趋势。

作者分工：刘杨晓月对数据集的开发做了总体设计；崔竞文采集和处理了数据；席永士设计了模型和算法；赵贯锋做了数据验证；崔竞文撰写了数据论文。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

[1] Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., *et al*. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660–684.

[2] Lesk, C., Rowhani, P., Ramankutty, N. Influence of extreme weather disasters on global crop production [J]. *Nature*, 2016, 529(7584): 84–87.

[3] He, X. G., Pan, M., Wei, Z. W., *et al*. A global drought and flood catalogue from 1950 to 2016 [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2020, 101(5): E508–E535.

[4] Wang, L., Chen, W., Fu, Q., *et al*. Super droughts over East Asia since 1960 under the impacts of global warming and decadal variability [J]. *International Journal of Climatology*, 2022, 42(9): 4508–4521.

[5] 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.

[6] Wang, W., Wang, P., Cui, W. A comparison of terrestrial water storage data and multiple hydrological data in the Yangtze River basin [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(6): 759–768.

[7] Kogan, F. N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection [J]. *Advances in Space Research*, 1995, 15(11): 91–100.

[8] Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., *et al*. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(5): 1937–1958.

[9] Tokarska, K. B., Stolpe, M. B., Sippel, S., *et al*. Past warming trend constrains future warming in CMIP6 models [J]. *Science Advances*, 2020, 6(12): eaaz9549.

[10] 崔竞文, 刘杨晓月, 席永士等. 多情景融合方法预测全球干旱实验数据集(2015–2100)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2026. https://doi.org/10.3974/geodb.2026.05.02.V1. https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2026.05.02.V1.

[11] 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]. (2017 年更新). http://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05.