

ENSO对极端水文事件的影响机制研究综述及展望

何 难, 尹家波*, 李佳瑞, 沈玗睿, 胡千棋, 金妍岑, 付 湘*

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年1月16日; 录用日期: 2026年2月13日; 发布日期: 2026年4月30日

摘 要

厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)是全球年际尺度最强的海气耦合信号, 通过调制大气环流和水汽输运, 深刻影响干旱和洪水等极端水文事件的时空分布、强度及传播规律。本文综述了ENSO对干旱、洪水、洪旱转换等极端水文事件影响的研究进展, 重点分析了区域响应差异、物理驱动机制、模型模拟能力及外部强迫干扰四个核心方面。研究发现, ENSO对极端水文事件的影响呈现显著的空间异质性, 主要通过“海温异常-环流调整-水汽输运-对流变化”的链式耦合过程影响旱涝灾害; 另一方面, ENSO类型、外部强迫和下垫面条件等多重因素也对旱涝灾害产生显著影响。尽管现有气候模型能捕捉到ENSO与极端水文事件的主导关联, 但在区域精细响应和外部强迫干扰模拟等方面仍有不足, 未来需重点关注ENSO指数标准化、多因子耦合机制、物理引导模型改进及长时序重建等工作, 为极端水文事件精准预测和灾害风险管理提供科学技术支撑。

关键词

ENSO, 极端水文事件, 遥相关, 物理机制, 气候模型

A Review and Prospect on the Impact Mechanisms of ENSO on Extreme Hydrological Events

Nan He, Jiabo Yin*, Jiarui Li, Dingrui Shen, Qianqi Hu, Yancen Jin, Xiang Fu*

State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: January 16, 2026; accepted: February 13, 2026; published: April 30, 2026

Abstract

El Niño-Southern Oscillation (ENSO) is the strongest interannual air-sea coupled signal on the global scale,

作者简介: 何难(2001-), 男, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面研究, Email: he_nan@whu.edu.cn

*通讯作者 Email: jboyn@whu.edu.cn, xfu@whu.edu.cn

文章引用: 何难, 尹家波, 李佳瑞, 沈玗睿, 胡千棋, 金妍岑, 付湘. ENSO 对极端水文事件的影响机制研究综述及展望[J]. 水资源研究, 2026, 15(2): 97-106. DOI: 10.12677/jwrr.2026.152013

which profoundly affects the spatiotemporal distribution, intensity, and propagation of extreme hydrological events such as droughts and floods by modulating atmospheric circulation and moisture transport. This paper reviews the research progress of ENSO impacts on extreme hydrological events including droughts, floods, and flood-drought alternation, focusing on four core aspects: regional response differences, physical driving mechanisms, model simulation capabilities, and disturbances from external forcing. It is found that the impacts of ENSO on extreme hydrological events exhibit significant spatial heterogeneity, mainly through the chained coupling process of “sea surface temperature anomaly-circulation adjustment-moisture transport-convective variation” to influence droughts and floods; meanwhile, multiple factors such as ENSO types, external forcing, and underlying surface conditions also exert significant impacts on droughts and floods. Although existing climate models can capture the dominant correlation between ENSO and extreme hydrological events, there are still deficiencies in simulating fine-grained regional responses and disturbances from external forcing. Future work should focus on the standardization of ENSO indices, multi-factor coupling mechanisms, physically informed model improvements, and long-term reconstruction, to provide scientific and technological support for accurate prediction of extreme hydrological events and disaster risk management.

Keywords

ENSO, Hydrological Extremes, Teleconnection, Physical Mechanisms, Climate Models

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

极端水文事件是全球最具破坏性的自然灾害之一，其频发态势对水资源安全、粮食生产及生态环境可持续发展构成严峻挑战[1][2]。传统极端水文事件的研究多聚焦单一事件的局地成因分析，如暴雨的地形触发或干旱的土壤墒情变化，但忽视了全球尺度气候变率对极端水文年际波动的调控作用[3][4]。气象雷达、雨量计等传统观测手段虽能提供局部高分辨率数据，但难以捕捉极端水文事件的跨区域关联及年际变率主导因子[5]。

在此背景下，厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)作为全球年际尺度最核心的气候信号，其对极端水文事件的调控作用成为研究热点[6]。ENSO通过改变热带太平洋海表温度(SST)的空间分布，调制沃克环流、西太平洋副热带高压等大尺度环流系统，进而重构全球水汽输送路径，最终导致区域极端干湿事件的异常频发[7][8]。从热带的火灾驱动干旱[9][10]到中国区域的暴雨洪水[11]-[13]，从印度季风区的极端降水[14][15]到全球主要流域的旱涝交替[16][17]，ENSO的影响贯穿不同尺度、不同类型的极端水文事件。

尽管已有研究论证了 ENSO 与极端水文事件具有较强关联，但目前仍存在诸多亟需探讨的议题：ENSO 不同相位、不同类型的影响存在显著区域差异，物理机制尚未完全明晰；气候模型对 ENSO 的遥相关及极端水文响应的模拟精度不足；对旱涝急转等复合极端水文事件的驱动机制与定量归因研究仍显不足；外部强迫对二者耦合关系的干扰机制仍需深入解析等。本文围绕区域响应差异、物理驱动机制、模型模拟能力及外部强迫干扰四个核心维度，系统梳理 ENSO 对极端水文事件影响的研究进展，明确当前研究缺口并展望未来方向。

2. 定义与类型

对极端水文事件和 ENSO 进行清晰界定是开展研究的基础，其定义与类型随着观测技术和研究需求的发展而不断细化。

2.1. 极端水文事件的定义与类型

极端水文事件通常是基于“统计罕见性”和“影响显著性”的双重标准来界定的。在统计上,研究多采用长时序观测数据的 95%或 99%百分位作为相对阈值,同时也可以采用行业标准的绝对阈值,如中国气象局将日降水量 ≥ 50 mm 定义为暴雨[18]。

与 ENSO 相关的极端水文事件可以进一步分为单一极端事件和复合极端事件。单一极端水文事件如持续性干旱、特大洪水和极端降水等,复合极端事件则包括旱涝急转、干旱-热浪复合事件等[19]。本文主要关注干旱、洪水和旱涝转换事件。

2.2. ENSO 的定义与类型

ENSO 根据海温异常的核心区域可以分为三类。第一类是东部太平洋增暖型(EP 型厄尔尼诺),其核心区位于 $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\text{W}\sim 170^{\circ}\text{W}$,对应 Niño3 指数 $\geq 1.0\sigma$ 。第二类是中部太平洋增暖型(CP 型厄尔尼诺,即 Modoki),其核心区位于 $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 、 $160^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{W}$,对应厄尔尼诺 Modoki 指数(EMI) ≥ 0.5 。第三类是东部太平洋冷却型(EPC 型,即拉尼娜),其核心区与 EP 型一致,对应 Niño3.4 指数 $\leq -1.0\sigma$ [20][21]。三类统称 EP/CP 型厄尔尼诺及拉尼娜(EPC 型)。在全球变暖背景下,传统的 Niño3.4 指数存在 0.64 ± 0.18 K/100ppm 的上升趋势,因此 van Oldenborgh 等提出了“相对 Niño3.4 指数”(扣除热带平均 SST 异常)以消除趋势污染,从而提升关联分析的准确性[10]。

3. 国内外研究现状

ENSO 对极端水文事件影响的研究历史悠久,可追溯至 20 世纪初。随着观测手段和模拟技术的持续发展,该领域的研究逐步从最初的定性关联演进成定量解析,形成了“现象识别-机制探究-模拟预测”的完整演进脉络。国外早期研究主要聚焦于 ENSO 对全球降水格局的宏观影响,1910 年 Walker 首次发现 ENSO 与印度季风降水之间存在关联[22],随后的研究基于长时序观测进一步证实了“厄尔尼诺年全球多数热带地区降水偏少、拉尼娜年降水偏多”这一基本规律[23]。21 世纪以来,研究进一步向精细化与多尺度拓展。Hill 等基于 120 年的观测数据,揭示了印度季风区在厄尔尼诺年虽然总降水减少,但中央季风带的极端降水强度却提升了 30%这一反直觉特征[15]; Sun 等利用 CMIP5 模型,预测 RCP4.5 情景下全球 45 个流域厄尔尼诺年干旱频率增加,61 个流域拉尼娜年洪水风险上升[17]; Chen 等发现 ENSO 驱动泛热带火灾呈“时空级联效应”,其影响从赤道亚洲传播至南美北部,且具有一定的滞后性[9]; Power 等则通过模型模拟,给出了 21 世纪极端 ENSO 事件增加对全球降水变率的影响预测[24][25]。此外,极端事件的长时序重建成为重要方向,D'Arrigo 等利用树轮和珊瑚代用数据,重建爪哇岛两百年秋季干旱序列,证实 ENSO 的长期调控作用[26]。

国内研究则以区域案例为核心,突显了响应不确定性的特征。早期研究主要关注 ENSO 与中国极端降水的关联[27],近年逐步拓展至不同区域和事件类型: Wu 等识别出中国东南部大范围极端降水的 6 类环流型,并发现其中 44%的低压型事件与 ENSO 相关[11][21]; 马思源和周建琴等通过区分 EP/CP 型厄尔尼诺,揭示了云南秋季 CP 型厄尔尼诺易导致干旱,而 EP 型厄尔尼诺则易导致洪涝的分化特征[28][29]; 徐静等结合青海东部的观测数据,发现 ENSO 对该区域旱涝的影响存在 2~3 年的滞后效应[30]。杨晓霞等分析鄱阳湖流域的极端降水,指出其与 Niño1+2 区海表温度(SST)的关联在 2010 年后显著增强[13]; 顾子也等结合 GRACE 卫星数据,揭示 ENSO 通过影响水汽辐合调控水文干旱的传播过程[31][32]。此外,针对外部强迫的研究逐步兴起,Zhang 等证实了火山喷发会破坏 ENSO 与极端温度的关联,从而削弱其中高纬极端水文的调控作用[1][33]。

4. 前沿研究方向

4.1. 区域响应差异

ENSO 对极端水文事件的影响呈现显著区域异质性,核心表现为“热带敏感、中高纬复杂”的空间格局[34],

同一区域对 ENSO 不同相位、类型的响应存在明确分化,这一特征由 ENSO 遥相关信号、局地环流系统、下垫面特征及其他气候模态的协同作用所致。

热带地区对 ENSO 响应最为集中且特征鲜明:印度季风区在厄尔尼诺年总降水显著减少,但中央季风带的极端降水强度反而明显提升[15][35][36];印尼爪哇岛的秋季干旱与 ENSO 呈显著负相关(厄尔尼诺年干旱频发),拉尼娜年则极端洪水频率大幅上升[37]-[39];泛热带区域还存在 ENSO 驱动的干旱“时空级联效应”,影响从赤道亚洲率先爆发,逐步传播至东南亚、南美南部,响应滞后时间达 4~16 个月[9][40][41]。中高纬区域的响应更复杂,且受 ENSO 相位的调控呈现明显不确定性:拉尼娜年表现出清晰的“干更干、湿更湿”特征,北美南部、中亚南部干旱加剧,澳大利亚洪水风险上升[17][42][43]。从季节来看,冷季(11 月至次年 4 月)的响应更突出——美国南部、中美洲极端降水增加超 50%,东南亚、澳大利亚则显著减少,且极端事件越罕见(如 99 百分位降水),对 ENSO 的响应越弱,部分区域还存在 1~3 个月的滞后效应[23]。

在中国,复杂的地理环境显著放大了 ENSO 对极端水文事件的影响,使其呈现出高度的复杂性和区域特异性。龚道溢等研究发现,ENSO 在中国形成了“南北反相、四季分化”的旱涝格局,即北方地区在夏秋冬季节易受 ENSO 影响而出现干旱,而江南和东南地区则在秋冬季节易发生洪涝[27]。在中国的流域及海域,研究揭示了更为精细的响应模式。例如,杨晓霞等发现鄱阳湖流域的极端降水对 ENSO 的响应呈现“东北向西南递减”的特征,且这种相关性在 2010 年后显著增强[13];张忠禹等发现中国近海冬季海洋热浪受到 ENSO 的显著影响,在厄尔尼诺年冬季,海洋热浪频发且分布较为均匀,而拉尼娜年海洋热浪发生频率则较低,其强度特征在南海、渤海、黄海和东海等不同海域也表现各异[44]。ENSO 对极端水文事件的影响常伴有滞后效应:徐静等在对青藏高原边缘农耕区的研究时发现,厄尔尼诺事件的影响在当月即显现,而拉尼娜的影响则可能会持续 2~3 个月,进而加剧区域干旱[30];盛宇裕等对秦岭-淮河地区的研究也指出了这种 ENSO 与灾害不同期的现象,厄尔尼诺可能导致 3 个月滞后的干旱,而拉尼娜则可能导致 4 个月滞后的洪涝[45];李芬对山西季节性旱涝的研究也强调了南方涛动指数(SOI)与滞后 1~3 个月的相关系数存在显著异质性,反映了 ENSO 影响的持续性[46]。EP/CP 型厄尔尼诺及拉尼娜对中国不同区域的影响也存在差异。陈文等发现 EP 型厄尔尼诺常导致“华北旱-江淮涝”和“江南北部滞后性涝”,而 CP 型厄尔尼诺则可能导致长江流域干旱和华南的局地洪涝[8];马思源等对云南地区的研究进一步表明,EP/CP 型厄尔尼诺及拉尼娜对区域降水的影响存在显著分化,其中 EP 型厄尔尼诺通常会增加秋季降水,CP 型厄尔尼诺则导致降水减少,这与西北太平洋气旋性环流的变化密切相关[28][29]。这些研究共同揭示了 ENSO 对全球及中国极端水文事件影响的复杂性与区域特异性,为区域尺度的精准预测和风险管理提供了基础。

4.2. 物理驱动机制

ENSO 对极端水文事件的调控作用,通过多尺度物理过程的链式耦合逐步传导,形成“海温异常-环流调整-水汽重构-对流变化-极端水文响应”的闭环。ENSO 通过海温异常驱动大气环流的显著调整:厄尔尼诺年,赤道东太平洋海表温度的正异常会显著削弱沃克环流,激发东亚-太平洋遥相关波列,导致西太平洋副热带高压偏西偏强,中高纬经向环流减弱[47];拉尼娜年则呈现相反特征,中高纬经向环流增强,冷空气南下频次增加,进而改变区域降水的动力条件。此外,ENSO 还通过加强西太平洋副高西伸,引发环流异常,进而增大南海北部潜热通量与南部的短波辐射通量,最终促进干旱、热浪等事件的发生[48][49]。水汽输送是连接环流异常与极端水文事件的关键纽带,ENSO 通过重构全球水汽源地和输送路径,直接调控区域极端降水的水汽供给[50][51]。Hill 等研究表明,厄尔尼诺期间大气柱水汽含量更高,异常强降水占比高于拉尼娜时期;平流层水汽的增加与强降水增多存在关联,为厄尔尼诺与极端降水的关联提供了机制支撑[15]。而对流与能量反馈进一步放大了极端水文响应,热带地区的对流浮力是极端降水的直接驱动因子,Chen 等发现厄尔尼诺年印度季风区对流浮力极端值的出现概率增加,且较为干燥的对流环境会抑制中度降水、放大极端降水的强度[9];Betts 等发现陆-气

水分反馈则导致干旱事件的响应存在明显滞后，如亚马逊流域的陆地水储量亏缺滞后降水异常达 9 个月[52]。

值得关注的是，ENSO 对极端水文事件的影响存在显著不对称性。He 等在月尺度洪旱转换研究中，通过相关性分析与水汽输送异常诊断，结合全球逐月月尺度洪旱转换事件统计与海洋尼诺指数(ONI)的耦合验证，发现 ENSO 对洪旱转换的影响存在相位不对称性：拉尼娜年时，洪旱转换的强度与影响范围均会被放大，强拉尼娜年的这种放大效应尤为突出；而厄尔尼诺年的影响则呈现明显异质性，部分情景下空间覆盖范围扩大但强度减弱，部分情景下覆盖范围收缩而强度快速增强，主要结果见图 1，该图直观呈现了 ENSO 对洪旱转换影响的相位不对称性[53]。这种不对称性，本质源于海温异常的空间分布、强度差异及环流遥相关的非线性响应[54][55]。其他气候模态也会调制 ENSO 对极端水文事件的影响。例如，IPO 正位相(赤道东太平洋年代际海温偏暖)时，Walker 环流上升支东移，印度季风区遭遇“特大干旱”，美国大盆地异常偏湿；IPO 负位相时两地干湿状态反转，其机制与风强迫海洋罗斯贝波影响年代际海温、海气相互作用及热带-中纬度相互作用相关[23][56][57]。

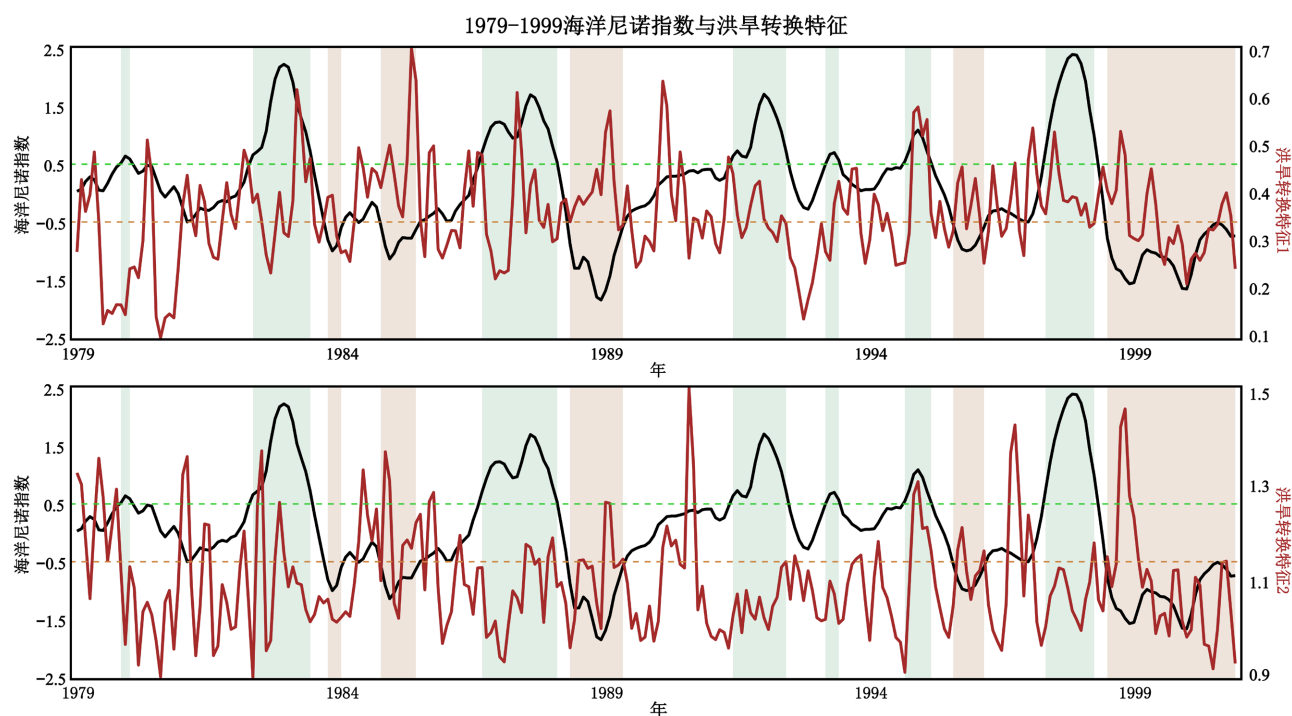


图 1. 1979~1999 年期间 ENSO 事件对洪旱转换特征的影响

4.3. 模型模拟能力

气候模型作为量化 ENSO-极端水文关联并开展未来情景预测的核心工具，当前研究主要基于 CMIP 系列模型、区域模型以及机器学习模型展开，其模拟能力呈现“全球可行、区域不足、机制有限”的特点。

在全球尺度上，气候模型已展现出一定的模拟能力。Sun 等发现 26 个 CMIP5 模型中 22 个能再现拉尼娜年东南亚极端洪水增加的特征，模拟结果与观测的相关系数达 0.75 [17]；Bellenger 等对比 CMIP3 与 CMIP5 模型，发现后者对 ENSO 遥相关的模拟偏差减少 15%~20% [58]；Power 等的研究则给出 21 世纪极端 ENSO 事件增加对全球降水变率的稳健预测[24]。区域模型的应用显著提升了局部响应的模拟精度，如 RegCM4 区域模型对东江流域 EP 型厄尔尼诺夏季降水的模拟偏差从 CMIP5 的 30%降至 15% [12]。机器学习模型也展现出高效预测潜力，Kent 等开发的 ACE2 模型基于 ERA5 数据训练，对热带降水的季节预测相关系数达 0.79，单次预测耗时仅

2 分钟，且能精准捕捉 ENSO 的对流层遥相关[59]。He 等在干旱识别与模型模拟前，通过随机森林等监督式机器学习分析发现，大气环流在部分重度干旱及干旱区域对陆地水储量变化起主导控制作用，为模型关键因子筛选提供实证依据的同时，进一步增强了模拟的物理机制支撑，主要结果见图 2，该图清晰展示了不同气候区陆地水储量变化主控因子的空间分布与主导差异特征[60]。

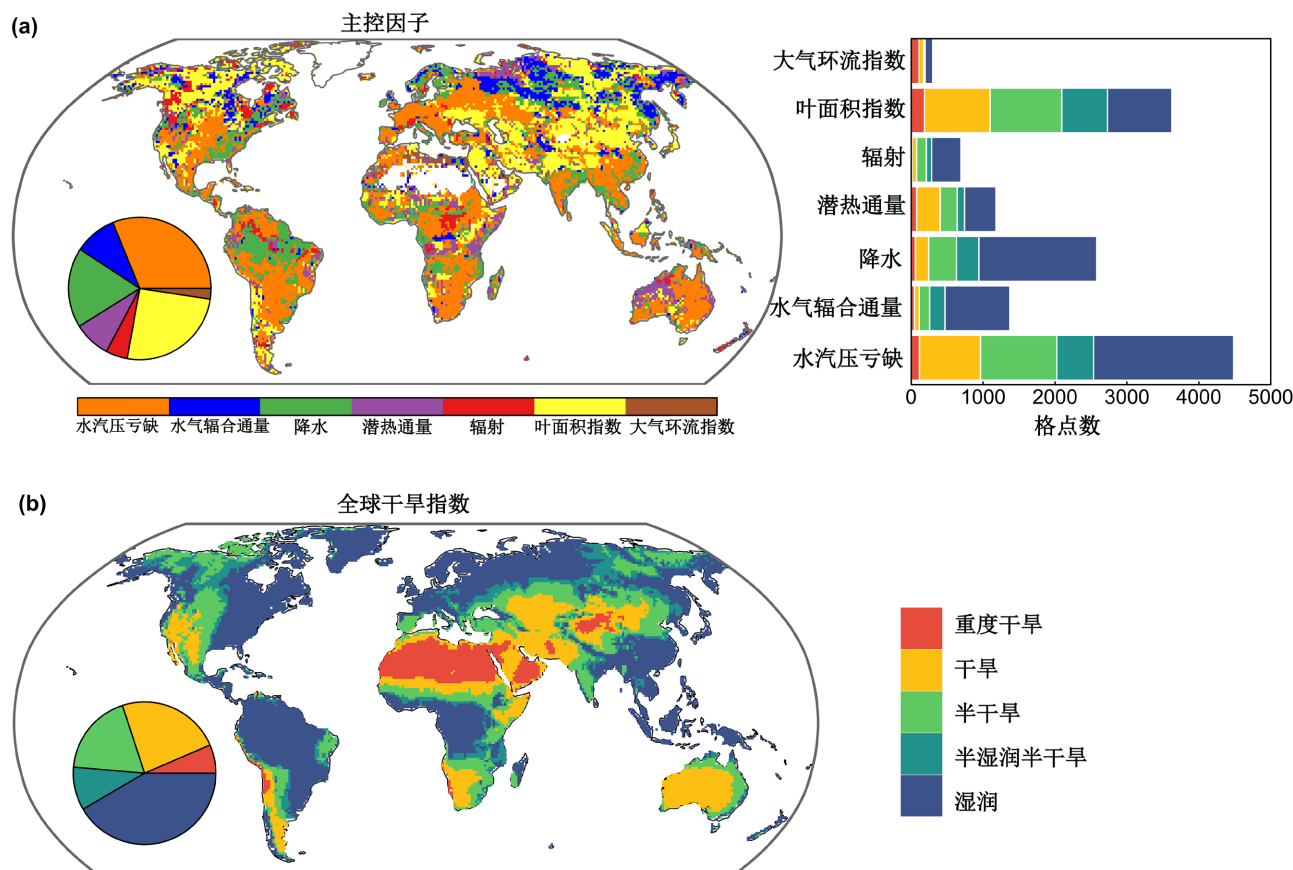


图 2. 1951~2022 年期间不同气候区陆地水储量变化的主控因子

然而，对于 ENSO 的影响的模型模拟方面仍存在显著缺陷：首先区域精细响应模拟不足，例如对云南 CP 型厄尔尼诺秋季降水的模拟偏差达 40%，无法复现西部与东部的差异[28]；其次是外部强迫模拟缺失，CMIP6 模型均未再现火山喷发对 ENSO-水文关联的破坏效应，模拟的中高纬极端干旱频率比观测偏低 25% [1]；除此之外 ENSO 指数定义差异导致模型间离散度较大，传统 Niño3.4 指数的趋势污染进一步放大不确定性[10]。如何融合观测数据与模型结果优化预测效果，已成为当前应用研究的重点。

4.4. 外部强迫干扰

近年来，外部强迫对 ENSO-极端水文事件耦合关系的干扰作用，成为该领域的新兴研究方向，其中强火山喷发的调制效应最为显著且得到广泛证实。强火山喷发(火山爆发指数 $VEI \geq 5$)会向平流层注入大量硫酸盐气溶胶，通过辐射强迫改变大气热力结构，破坏中高纬度大气环流的稳定性[33]，进而导致大部分的 ENSO-温度关联区域失效。这种环流破坏会间接影响全球水汽输送路径和对流活动条件，使得火山喷发年份 ENSO 对中高纬度干旱、洪水等极端水文事件的调控作用显著减弱，仅热带区域由于 ENSO 遥相关信号更强，其响应保持相对稳定[1] [61]。此外，火山喷发的干扰还会导致基于温度代用数据(如树轮、冰芯)的 ENSO 重建存在偏差，因为

火山喷发引发的温度异常与 ENSO 导致的温度变化相互叠加，难以直接分离，进而影响历史极端水文事件的成因归因准确性[26][62]。这一发现揭示了 ENSO 与极端水文事件的关联并非绝对稳定，外部强迫的介入会打破二者的固有联系，为理解自然变率背景下极端水文事件的复杂性提供了新视角，也对未来模型改进提出了“考虑多强迫因子协同作用”的新要求。

5. 结论与展望

5.1. 结论

ENSO 作为全球年际气候变率的核心因子，对极端水文事件的影响呈现“区域异质、机制复杂、模型受限”的核心特征。区域响应上，热带地区对 ENSO 更加敏感，以干旱、洪水的强信号响应为主；中高纬及复杂下垫面区域呈现相位/类型分化响应，局地因子与 ENSO 协同作用显著；物理机制上，ENSO 通过“海温异常-环流调整-水汽重构-对流变化”的链式耦合影响极端水文事件，环流遥相关和水汽输送是关键传导环节，且存在显著的不对称性和滞后效应；模型模拟上，现有 CMIP 系列模型能捕捉全球尺度主导关联，但对区域精细响应、外部强迫干扰的模拟能力不足，ENSO 指数缺乏统一标准进一步放大结果不确定性；外部强迫上，火山喷发等事件通过破坏大气环流，削弱 ENSO 对极端水文事件的调控作用，为 ENSO-极端水文关联的稳定性研究提供了新视角。

5.2. 未来展望

结合现有研究缺口与实际应用需求，未来 ENSO 对极端水文事件影响的研究将聚焦以下方向：

1) 推进 ENSO 指数标准化与类型细分：统一 NINO 区指数判定标准，细化 EP/CP/EPC 型、不同强度 ENSO 的分类，减少指数差异导致的研究不确定性[63]；深化多因子耦合机制解析：结合观测与高分辨率模型，揭示 ENSO 与太平洋年代际振荡(PDO)、北极涛动(AO)等因子的协同/拮抗作用，明确局地下垫面(地形、植被)对机制的调制效应[64][65]。

2) 改进模型模拟与预测能力：将物理机制约束嵌入模型参数化方案，提升区域精细响应和外部强迫干扰的模拟精度；发展多模型集合与机器学习融合方法，提升季节尺度极端水文事件预测技巧[66]；拓展长时序与跨尺度研究：利用树轮、珊瑚等代用数据，延伸 ENSO-极端水文事件的关联序列至百年/千年尺度[26]，揭示自然变率背景下的长期规律。

3) 强化应用导向研究：结合流域水资源管理、灾害风险防控需求，开发 ENSO 驱动的极端水文事件预警指标体系，为精准防灾减灾提供技术支撑。

基金项目

本研究受国家自然科学基金(T2522026, 52479023, 52441902, 52361145864, W2521014, W2421111)和湖北省自然科学基金(2024AFA055)资助。

参考文献

- [1] ZHANG, X., LI, J. B., XIE, S. P., et al. Volcanic eruptions disrupt ENSO teleconnections with land summer temperature. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 9882. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64879-w>
- [2] 夏军, 陈进, 余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策[J]. *水利学报*, 2022, 53(10): 1143-1153.
- [3] 顾磊, 陈杰, 尹家波, 等. 气候变化下中国主要流域气象水文干旱潜在风险传播[J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 321-333.
- [4] XIONG, J., YANG, Y. Climate change and hydrological extremes. *Current Climate Change Reports*, 2025, 11(1): 1. <https://doi.org/10.1007/s40641-024-00198-4>
- [5] LENGFELD, K., KIRSTETTER, P. E., FOWLER, H. J., et al. Use of radar data for characterizing extreme precipitation at fine

- scales and short durations. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(8): 085003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab98b4>
- [6] MCPHADEN, M. J., ZEBIAK, S. E. and GLANTZ, M. H. ENSO as an integrating concept in earth science. *Science*, 2006, 314(5806): 1740-1745. <https://doi.org/10.1126/science.1132588>
- [7] 张人禾, 闵庆辉, 苏京志. 厄尔尼诺对东亚大气环流和中国降水年际变异的影响: 西北太平洋异常反气旋的作用[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(5): 544-553.
- [8] 陈文, 丁硕毅, 冯娟, 等. 不同类型 ENSO 对东亚季风的影响和机理研究进展[J]. *大气科学*, 2018, 42(3): 640-655.
- [9] CHEN, Y., MORTON, D. C., ANDELA, N., et al. A pan-tropical cascade of fire driven by El Niño/Southern Oscillation. *Nature Climate Change*, 2017, 7(12): 906-911. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0014-8>
- [10] VAN OLDENBORGH, G. J., et al. Defining El Niño indices in a warming climate. *Environmental Research Letters*, 2021, 16: 044003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe9ed>
- [11] WU, X., TAN, X., CHEN, X., et al. Synoptic circulation forcing of large-scale extreme precipitation events over southeastern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2024, 129(17): e2024JD041396. <https://doi.org/10.1029/2024jd041396>
- [12] ZHANG, Q., LI, J., SINGH, V. P., et al. Influence of ENSO on precipitation in the East River basin, south China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(5): 2207-2219. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50279>
- [13] 杨晓霞, 吴娟, 刘佳, 等. 鄱阳湖流域极端降水时空变化特征及 ENSO 事件影响分析[J]. *水资源研究*, 2021, 10(1): 33.
- [14] GOSWAMI, B. N., VENUGOPAL, V., SENGUPTA, D., et al. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment. *Science*, 2006, 314: 1442-1445. <https://doi.org/10.1126/science.1132027>
- [15] HILL, S. A., MEYERS, D. Z., SOBEL, A. H., et al. More extreme Indian monsoon rainfall in El Niño summers. *Science*, 2025, 389(6753): 1220-1224. <https://doi.org/10.1126/science.adg5577>
- [16] CAI, W., et al. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 2014, 4: 111-116. <https://doi.org/10.1038/nclimate2100>
- [17] SUN, Q., MIAO, C., AGHAKOUCHAK, A., et al. Possible increased frequency of ENSO-related dry and wet conditions over some major watersheds in a warming climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2020, 101(4): E409-E426. <https://doi.org/10.1175/bams-d-18-0258.1>
- [18] LIU, W., WU, J., TANG, R., et al. Daily precipitation threshold for rainstorm and flood disaster in the mainland of China: An economic loss perspective. *Sustainability*, 2020, 12(1): 407. <https://doi.org/10.3390/su12010407>
- [19] 冯扬, 秦鹏程, 胡一阳, 等. 长江流域复合极端气候事件指标及识别方法综述[J]. *人民长江*, 2025, 56(3): 95-105.
- [20] YU, J. Y., KAO, H. Y., LEE, T., et al. Subsurface ocean temperature indices for central-Pacific and eastern-Pacific types of El Niño and La Niña events. *Theoretical and Applied Climatology*, 2011, 103(3-4): 337-344. <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0307-6>
- [21] 袁媛, 杨辉, 李崇银. 不同分布型厄尔尼诺事件及对中国次年夏季降水的可能影响[J]. *气象学报*, 2012, 70(3): 467-478.
- [22] WALKER, G. T. On the meteorological evidence for supposed changes of climate in India. Technical Report, India Meteorological Department, 1910.
- [23] KENYON, J., HEGERL, G. C. Influence of modes of climate variability on global precipitation extremes. *Journal of Climate*, 2010, 23(18): 6248-6262. <https://doi.org/10.1175/2010jcli3617.1>
- [24] POWER, S. B., CHUNG, C., KOCIUBA, G. and KEAY, K. Robust twenty-first-century projections of El Niño and related precipitation variability. *Nature*, 2013, 502: 541-545. <https://doi.org/10.1038/nature12580>
- [25] POWER, S. B., DELAGE, F. P. D. El Niño-Southern Oscillation and associated climatic conditions around the world during the latter half of the twenty-first century. *Journal of Climate*, 2018, 31(15): 6189-6207. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-18-0138.1>
- [26] D'ARRIGO, R., WILSON, R., PALMER, J., et al. Monsoon drought over Java, Indonesia, during the past two centuries. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(4): L04709. <https://doi.org/10.1029/2005gl025465>
- [27] 龚道溢, 王绍武. ENSO 对中国四季降水的影响[J]. *自然灾害学报*, 1998, 7(4): 44-52.
- [28] 马思源, 金燕, 张思, 等. 厄尔尼诺/南方涛动事件对云南秋季气象干旱的不同影响分析[J]. *干旱气象*, 2023, 41(6): 860-872.
- [29] 周建琴, 晏红明. 东部和中部型 El Niño 事件对云南冬季降水影响的差异分析[J]. *高原气象*, 2021, 40(1): 98-108.
- [30] 徐静, 张鑫. 青海省东部地区气候变化与 ENSO 事件关系[J]. *水文*, 2012, 32(4): 88-95.
- [31] 顾子也, 顾磊, 尹家波, 等. 中国陆域干旱的大气环流机制及早情传播规律[J]. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54(8): 2674-2689.
- [32] 尹家波, 郭生练, 杨妍, 等. 基于陆地水储量异常预估中国干旱及其社会经济暴露度[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(10): 2061-2076.

- [33] STENCHIKOV, G., et al. Arctic Oscillation response to the 1991 Mount Pinatubo eruption: Effects of volcanic aerosols and ozone depletion. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107: 4803. <https://doi.org/10.1029/2002jd002090>
- [34] DOGAR, M. M., KUCHARSKI, F. and AZHARUDDIN, S. Study of the global and regional climatic impacts of ENSO magnitude using SPEEDY AGCM. *Journal of Earth System Science*, 2017, 126(2): 30. <https://doi.org/10.1007/s12040-017-0804-4>
- [35] ATHIRA, K. S., ROXY, M. K., DASGUPTA, P., et al. Regional and temporal variability of Indian summer monsoon rainfall in relation to El Niño southern oscillation. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 12643. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38730-5>
- [36] WANG, B., LUO, X. and LIU, J. How robust is the Asian precipitation-ENSO relationship during the industrial warming period (1901-2017)? *Journal of Climate*, 2020, 33(7): 2779-2792. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0630.1>
- [37] D'ARRIGO, R., SMERDON, J. E. Tropical climate influences on drought variability over Java, Indonesia. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(5): 2007GL032589. <https://doi.org/10.1029/2007gl032589>
- [38] PRATIWI, E. P. A., MURTI, C. K. W. and WIDIASTUTI, E. I. Assessment of the 2015 and 2019 droughts in the rice agriculture sector in Java. In *International Conference on Sustainable Environment, Agriculture and Tourism (ICOSEAT 2022)*. Dordrecht: Atlantis Press, 2022: 352-359. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-086-2_46
- [39] AGROTEKNOLOGI, P. S., PERTANIAN, F., JEMBER, U., et al. Pola Spasial Kekeringan di Jawa Barat Pada Kondisi El Nino Berbasis Metode Palmer Drought Severity Index (PDSI). *Pengairan*, 2021, 12(1): 16-29. <https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2021.012.01.02>
- [40] NGUYEN, P., MIN, S. and KIM, Y. Combined impacts of the El Niño-Southern Oscillation and Pacific Decadal Oscillation on global droughts assessed using the standardized precipitation evapotranspiration index. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(S1): E1645-E1662. <https://doi.org/10.1002/joc.6796>
- [41] YIN, H., WU, Z., FOWLER, H. J., et al. Combined impacts of ENSO and IOD on global seasonal droughts. *Atmosphere*, 2022, 13(10): 1673. <https://doi.org/10.3390/atmos13101673>
- [42] LUO, J. J., LIU, G., HENDON, H., et al. Inter-basin sources for two-year predictability of the multi-year La Niña event in 2010-2012. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2276. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01479-9>
- [43] DE LUCA, P., MESSORI, G., WILBY, R. L., et al. Concurrent wet and dry hydrological extremes at the global scale. *Earth System Dynamics*, 2020, 11(1): 251-266. <https://doi.org/10.5194/esd-11-251-2020>
- [44] 张忠禹, 贾文韬, 高振力, 等. ENSO 对冬季中国近海海洋热浪事件的影响分析[J]. *气候变化研究快报*, 2024, 13(6): 1554-1563.
- [45] 盛宇裕, 毕硕本, 路明月, 等. 1951-2011 年 ENSO 事件对秦岭-淮河地区旱涝灾害的影响分析[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(4): 418-428.
- [46] 李芬, 张玮玮, 乔云红. 近 56 年山西季节旱涝对 ENSO 事件的响应[J]. *灾害学*, 2015, 30(4): 85-90.
- [47] 黄荣辉. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其物理机制的研究[J]. *大气科学*, 1990, 14(1): 108-117.
- [48] ZONG, H., LIU, Y., XIU, P., et al. Interannual variability of latent and sensible heat fluxes in the South China Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(1): 153-159. <https://doi.org/10.1007/s00343-010-9241-9>
- [49] LIU, K., XU, K., ZHU, C., et al. Diversity of marine heatwaves in the South China Sea regulated by ENSO phase. *Journal of Climate*, 2022, 35(2): 877-893. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-21-0309.1>
- [50] LI, X., ZHOU, W., CHEN, D., et al. Water vapor transport and moisture budget over Eastern China: Remote forcing from the two types of El Niño. *Journal of Climate*, 2014, 27(23): 8778-8792. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00049.1>
- [51] WANG, Q., CAI, W., ZHONG, W., et al. Response of Southern China winter rainfall to El Niño diversity and its relevance to projected Southern China rainfall change. *Journal of Climate*, 2019, 32(11): 3343-3356. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-18-0571.1>
- [52] BETTS, R. A., JONES, C., KNIGHT, J. R., KEELING, R. and KENNEDY, J. J. El Niño and a record CO₂ rise. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 806-810. <https://doi.org/10.1038/nclimate3063>
- [53] HE, N., YIN, J., LIU, P., et al. Global increases in dry-wet abrupt alternation events under climate change. *Geophysical Research Letters*, 2025, 52: e2025GL117322. <https://doi.org/10.1029/2025gl117322>
- [54] FENG, J., CHEN, W. and LI, Y. J. Asymmetry of the winter extra-tropical teleconnections in the Northern Hemisphere associated with two types of ENSO. *Climate Dynamics*, 2017d, 48(7-8): 2135-2151. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3196-2>
- [55] 闪丽洁, 张利平, 张艳军, 等. 长江中下游流域旱涝急转事件特征分析及其与 ENSO 的关系[J]. *地理学报*, 2018, 73(1): 25-40.
- [56] ALLAN, R. P., SODEN, B. J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 2008, 321: 1481-1484. <https://doi.org/10.1126/science.1160787>
- [57] MEEHL, G. A., HU, A. Megadroughts in the Indian monsoon region and southwest North America and a mechanism for associated multidecadal Pacific sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, 2006, 19: 1605-1623. <https://doi.org/10.1175/jcli3675.1>

- [58] BELLENGER, H., GUILYARDI, E., LELOUP, J., LENGAIGNE, M. and VIALARD, J. ENSO representation in climate models: From CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, 2014, 42: 1999-2018. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1783-z>
- [59] KENT, C., SCAIFE, A. A., DUNSTONE, N. J., et al. Skilful global seasonal predictions from a machine learning weather model trained on reanalysis data. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2025, 8(1): 314. <https://doi.org/10.1038/s41612-025-01198-3>
- [60] HE, N., YIN, J., SLATER, L. J., et al. Global terrestrial drought and its projected socioeconomic implications under different warming targets. *Science of the Total Environment*, 2024, 946: 174292. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174292>
- [61] ROBOCK, A., MARQUARDT, A., KRAVITZ, B., et al. Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(19): 2009GL039209. <https://doi.org/10.1029/2009gl039209>
- [62] SIGL, M., WINSTRUP, M., MCCONNELL, J.R., et al. Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. *Nature*, 2015, 523(7562): 543-549. <https://doi.org/10.1038/nature14565>
- [63] 王远泽. 厄尔尼诺与南方涛动指数的研究综述[J]. *科技与创新*, 2018(23): 82-83.
- [64] WANG, S., HUANG, J., HE, Y., et al. Combined effects of the Pacific Decadal Oscillation and El Niño-Southern Oscillation on global land dry-wet changes. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 6651. <https://doi.org/10.1038/srep06651>
- [65] CHEN, S., CHEN, W., YING, J., et al. Interdecadal modulation of the Pacific Decadal Oscillation on the relationship between spring Arctic Oscillation and the following winter ENSO. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 9: 810285. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.810285>
- [66] TIPPETT, M. K., L'HEUREUX, M. L., BECKER, E. J., et al. Excessive momentum and false alarms in late-spring ENSO forecasts. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(8): e2020GL087008. <https://doi.org/10.1029/2020gl087008>