中国科学: 地球科学 2023 年 第 53 卷 第 11 期: 2560 ~ 2574
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述

青藏高原干旱与洪涝事件演变及应对关键问题

路洁[1], 许澍[1], 秦天玲[1,2*], 何鑫[1], 严登华[1,2†], 张诚[1], Sintayehu A. ABEBE[1,3]

1. 中国水利水电科学研究院流域水循环与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 中国水利水电科学研究院内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 呼和浩特 010020;
3. Hydraulic and Water Resources Engineering Department, Debre Markos University Institute of Technology, Debre Markos 999047, Ethiopia
* 通讯作者, E-mail: qintl@iwhr.com
† 通讯作者, E-mail: yandh@iwhr.com

收稿日期: 2022-11-23; 收修改稿日期: 2023-07-01; 接受日期: 2023-08-19; 网络版发表日期: 2023-10-23
国家重点研发计划项目(编号: 2022YFC3201705)资助

摘要 青藏高原是全球气候变化的敏感区, 区域旱涝事件特性迥异, 诱发了系列水安全和生态环境问题, 亟须创新旱涝灾害适应性调控理论与方法. 本文识别了青藏高原干旱与洪涝事件演变新情势, 从旱涝监测模拟、预报预警、风险防控与应急处置等方面解析已有研究进展, 发现存在多源数据融合不足、预报预警精度低、旱涝灾害链驱动机制不明晰和风险防控措施针对性不强等问题. 在此基础上提出未来研究热点, 并详细阐述水资源系统视角下青藏高原旱涝演变规律及遭遇特性识别、耦合数值模拟与知识挖掘的旱涝预测预警、旱涝灾害链风险阻断点识别与适应性调控等可能的研发路径, 以期为青藏高原水旱灾害防治、水资源保护、生态修复及气候变化应对等提供技术支撑.

关键词 旱涝情势, 监测模拟, 预报预警, 风险防控与应急处置, 青藏高原

1 引言

青藏高原是中国重要的生态安全屏障和水资源战略储备区, 多年平均产水量约7780亿m^3, 出境水量可满足下游14亿人口的用水需求, 战略地位十分重要(胡春宏等, 2022). 1961~2021年间高原平均增温速率达0.36℃ $(10a)^{-1}$, 表现出高于全球增温幅度的暖化现象(Dong N等, 2022). 区域地貌复杂、水源多样、水循环对气候变化敏感, 独特的地理地质环境和多变的气候条件导致该区旱涝等极端水文事件特性迥异(Feng等, 2020). 一方面, 青藏高原降水、冰雪融水、土壤冻融等复杂的多相态水循环共存, 在温升背景下融雪融冰型洪涝发生频率呈增加趋势, 由此带来的冰湖溃决洪水、地下冰融水洪水等新型洪涝灾害以及山洪、滑坡、泥石流等次生地质灾害风险加大(姚檀栋等, 2019; Sattar等, 2022); 另一方面, 虽然区域整体表现为暖湿化, 但极端干旱事件仍时有发生, 并对农牧业减产和生态环境破坏表现出明显的积累效应、放大效应、滞后效应和空间转移效应(Mondal等, 2023). 因此, 厘清气候变化下青藏高原旱涝特性并制定针对性的适应性调控策略十分重要.

近年来, 遥感技术的不断发展使区域气象水文要

中文引用格式: 路洁, 许澍, 秦天玲, 何鑫, 严登华, 张诚, Abebe S A. 2023. 青藏高原干旱与洪涝事件演变及应对关键问题. 中国科学: 地球科学, 53(11): 2560–2574, doi: 10.1360/SSTe-2022-0381
英文引用格式: Lu J, Xu S, Qin T, He X, Yan D, Zhang C, Abebe S A. 2023. Evolution of drought and flood events on the Qinghai-Tibet Plateau and key issues for response. Science China Earth Sciences, 66(11): 2514–2529, https://doi.org/10.1007/s11430-022-1168-0

© 2023 《中国科学》杂志社

素观测资料得到快速补充，极值评价指标的不断改进使旱涝演变特征得到更好的描述，灾害机理认知的不断深入使旱涝综合应对措施更具针对性(Wang T等, 2021). 然而，青藏高原地理特征独特，适用于平原和低海拔地区的旱涝研究方式和应对模式难以在本区直接应用. 已有研究在青藏高原旱涝监测模拟、预报预警方面均已取得有意义的研究成果(van Hoek等, 2020; You等, 2022). 但一些研究结论和观点不一致, 对青藏高原旱涝规律、灾害效应等方面的认识缺乏系统总结，且缺少完善的旱涝风险管理和防控技术. 因此，在概述青藏高原旱涝演变新情势基础上，全面总结和梳理相关研究成果，针对当前存在的不足，聚焦科学问题，并提出研发路径，对理解青藏高原旱涝遭遇特性及带来的影响和危害，更好应对和防御旱涝灾害风险, 具有重要的科学价值和现实意义.

2 青藏高原干旱与洪涝事件演变新情势

2.1 总体演变态势

青藏高原发育大面积冰川、雪盖，且湖泊、冻土广布, 固态水资源量十分丰富. 但在温升背景下, 高原冰冻圈、大气圈、水圈和生物圈之间相互作用导致了冰川积雪融化、永久冻土退化、湖泊扩张及亚洲水塔的水文失衡(Yao等, 2019).

冰川积雪融水量与湖泊储量变化息息相关，尤其是依靠融水补给的冰湖(Liu等, 2021). 受温升的影响, 青藏高原雨雪比例、干湿雪比例等降雪特性以及积雪初日、终日和积雪期等积雪时间的变化减少了积雪的密实化, 加速了积雪升华和融化, 且冻土提前消融改变了积雪融水的入渗和产汇流环节，最终影响融雪洪水的形成过程，使冰湖溃决风险加大(You等, 2020). 与此同时，青藏高原及周边地区的冰川呈不同程度的萎缩. 据统计，青藏高原西部纳伦河流域和东部祁连山地区的冰川面积30年间萎缩了约23%；高原南部喜马拉雅山西段和东段以及天山西段的冰川面积萎缩率也在15%以上(Hagg等, 2013). 冰川加速退缩和积雪融化使水资源在短期内增加, 但从长远看, 供水量将逐渐减少(Huss和Hock, 2018). 同时，还会导致冰川不稳定性增强, 次生灾害风险加剧.

多年冻土退化表现为地温升高、活动层变厚甚至局部地区多年冻土消失. 从20年代初至21世纪初，青藏高原多年冻土区年平均气温上升率为0.016~0.036℃ a^{-1}, 地温增温率为0.11~0.98℃ $(10a)^{-1}$. 20世纪80年代以来青藏高原地区活动层厚度增加了0.15~0.67m，变化率约为1.33cm a^{-1}(康世昌等, 2020). 永久冻土会阻止降水入渗，减少降水向地下水的转化，同时冻土融水可补给湖泊、高寒草甸沼泽和河滩，对径流的稳定分布有重要影响. 但多年冻土退化减弱了对径流的调节作用, 也加大了区域的旱涝风险(Ran等, 2017).

2.2 灾害链式效应

由于青藏高原特殊复杂的地理环境，旱涝灾害在一定条件下会产生链式效应，不同灾种间相互激发, 最终导致灾害及损失在时空上的延拓. 一方面，干旱严重时会引发沙尘暴、荒漠化、火灾和蝗灾，最终导致青藏高原农牧业减产, 如图1a所示; 另一方面, 升温加剧了冰川积雪消融和土壤冻融过程，容易发生融冰融雪性洪水，也为次生灾害的发育和形成提供了物源基础和水源条件, 使冰湖数量增多, 面积增大. 冰川活动强烈时, 常以冰崩或冰滑坡形式落入冰湖, 漫过冰碛坝, 造成冰湖堤坝溃决型洪水(Yang等, 2022), 同时也可能进一步激发山洪、滑坡、泥石流等地质灾害的发生, 如图1b所示. 1975年发生在祁连县牛心山北侧的滑坡，冲毁林地1980亩，损失林木189万m^3，造成重大的经济损失和人员伤亡. 时间延拓方面, 干旱导致草地退化进而造成畜牧业减产，对灾害响应可能表现出明显的滞后性；空间延拓指青藏高原旱涝可能会影响江河中下游的水循环和生态系统稳定.

2.3 生态效应

青藏高原气候暖湿化为森林、灌丛、草地生态系统创造了有利条件，大大缓解了植被对水分及热量的需求, 增加了净初级生产力. 自20世纪80年代以来, 由于生长季的延长, 整个青藏高原都出现了绿化. 在过去的一个世纪中, 树木向高海拔平均上移了约18m, 由于植物生长的最佳温度低于当前生长季的气温，预计这种绿化将会持续下去(Yao等, 2022). 气候变暖短期引起了局地生态改善，但其背后也潜藏着一系列生态安全问题(Li等, 2019; Wang Y W等, 2021).

一方面，增温会使高原植物群落物种丰富度快速降低26~36%, 尤其对于高寒草原(吴红宝等, 2019). 高原植被群落分布界线向更高海拔迁移，群落组成发生

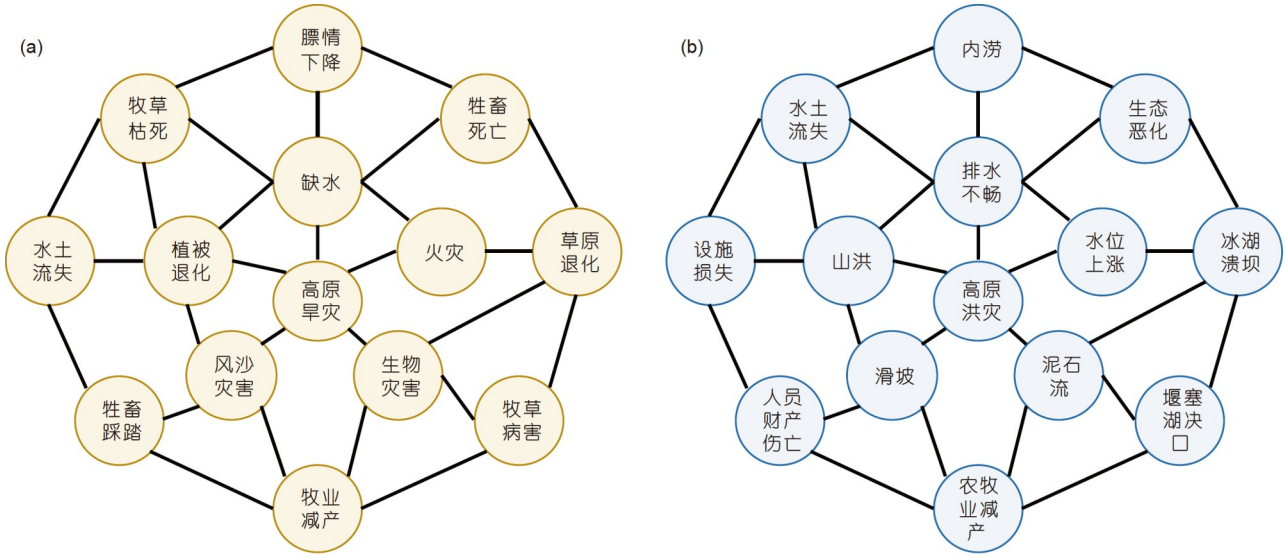

图 1　青藏高原旱涝灾害链

改变, 原生植被群落优势种群减少, 如高原内适应干旱环境的矮嵩草群落替代了华扁穗草群落, 最终演替为沙生薹草(*Carex praeclara Nelmes*)群落(He和Richards, 2015), 最终导致高原内部草场退化, 水源涵养能力下降, 荒漠化和水土流失加剧; 另一方面, 高原多年冻土退化将直接导致高寒草甸和高寒沼泽草甸生态系统的退化. 近15年来, 青藏高原高寒沼泽草甸和高寒草甸表层土壤变粗, 土壤有机质含量显著降低, 分布面积分别减少了28.11%、7.98%. 同时, 青藏高原81%的冰川生态系统处于退缩状态, 加剧了“亚洲水塔”功能的不稳定性, 容易引发旱涝灾害及衍生灾害. 如强降水等在地势陡峭区域会引发泥石流、滑坡等自然灾害, 导致高寒草地和草甸退化、种群演替、地表干旱化, 加剧土壤侵蚀程度, 对生态系统产生不可逆的破坏(Yao等, 2022).

2.4　社会经济效应

青藏高原每年都会发生不同程度的旱涝灾害. 1950年至今, 旱涝发生频率和严重程度虽呈减少和减弱的势头, 但仍有极端事件发生, 威胁程度大. 据《中国气象灾害年鉴》和《中国水旱灾害公报》统计, 1950~2019年农作物因旱受灾面积累计5740khm^2, 20世纪70年代和20世纪90年代超百万亩特大干旱发生频率分别达70%和60%, 如图2a所示; 近20年来虽然干旱程度有所缓解, 但仍有5年发生特大干旱, 2017年旱情最重, 农业区50%以上耕地出现中度至重度干旱, 农作物受灾达243.9khm^2. 近70年超百万亩特大洪灾发生频率达24%, 农作物因涝受灾程度整体在2000年后有所下降, 如图2b所示.

据2004~2020年《中国水旱灾害公报》统计, 21世纪初虽然旱灾灾情有所减弱, 但趋势并不显著. 最严重旱灾发生于2011年, 为夏秋季干旱, 造成228.5万人受灾, 直接经济损失16.07亿元. 此外, 青藏高原旱灾会破坏植被和草原生态系统, 打破牲畜和草原承载之间的平衡, 出现牲畜无水可饮、无食可吃的情况, 畜牧业损失加重(图3a~3d). 青藏高原洪涝灾害造成的受灾人口和经济损失分别以0.58万人/年和0.95亿元/年的速率增长. 因涝公路中断和水利设施经济损失分别以100.71条/年和0.44亿元/年的速率增长, 严重影响川藏公路等交通安全和运力的发挥(图3e~3h).

3　青藏高原旱涝研究进展及关键问题

面向水安全保障和国家水网建设重大需求, 着眼于青藏高原旱涝事件演变新情势, 围绕目前相关研究存在的主要问题, 以气候变化背景下“自然-人工”二元水循环极端场景为主线, 以灾害相关理论为核心, 以大数据挖掘、极值统计理论、水文模型模拟、地理信息系统等为关键支撑, 以“监测模拟-预测预警-风险防控与应急处置”为主要思路, 提出青藏高原旱涝灾害应对

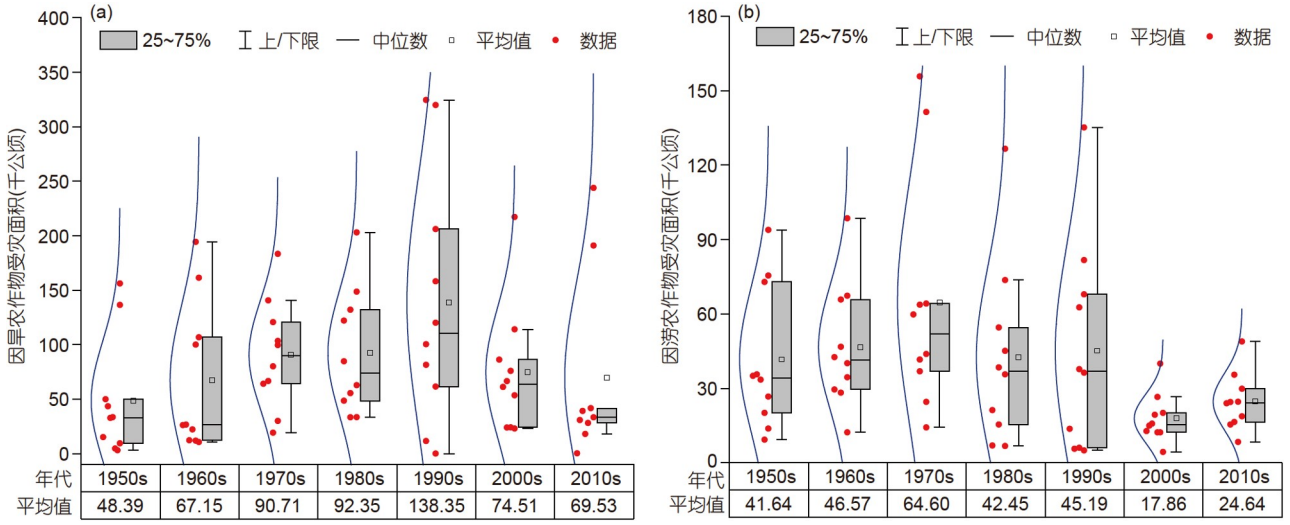

图 2　1950~2019年青藏高原因旱涝导致的农作物受灾面积情况

据青海省和西藏自治区统计. 其中, 1950~2002年受灾情况据温克刚和刘光轩(2007)、温克刚和王莘(2007); 2003~2019年受灾情况依据《中国气象灾害年鉴》(2004~2020)

研发路径及关键技术问题.

3.1　旱涝监测模拟

3.1.1　研究进展

(ⅰ) 气象水文要素精细化监测. 高效的水文气象监测系统是发展高精度旱涝灾害预报的前提和基础. 长期以来, 气象水文要素数据获取主要依赖于陆地表面观测站网, 但青藏高原山高谷深、下垫面复杂多变, 区域内观测站点布设稀疏且空间分布不均, 观测数据资料系列短且不连续, 制约了青藏高原旱涝的监测和认识(Liu等, 2022). 为丰富实测数据, 第三极环境(TPE)在南错、林芝和珠穆朗玛峰等研究不足的地方布设了20多个站点, 收集了来自不同学科的2000多个数据集, 并发展了实时、高精度的三维监测技术(Gao等, 2019). 但总体来说观测站点空间代表性不足常会在估计面要素时产生误差, 成为水文模拟中重要的不确定性来源. 如Yao等(2012)根据典型冰川数据的观测结果, 发现近20年西南河流源区水储量呈下降趋势, 而Jacob等(2012)根据GRACE卫星观测数据发现呈增加趋势, 两者结论完全相反.

近年来基于天气雷达与空间卫星的遥感观测技术得到不断完善, 已逐步成为区域水文气象监测与水文模拟的重要观测数据源. 遥感数据能更好地反映水文要素的空间分布, 在一定程度上解决广大缺测资料地区地面观测信息不足的问题, 但产品时间序列短, 且与实测资料比精度低(Munawar等, 2022). 有研究对中国不同分区降水卫星产品进行评估, 发现西北荒漠区和青藏高原区表现最差(彭振华等, 2021). 此外, 还有通过气象观测资料与物理动力学模型进行模拟得到的再分析数据产品, 这类产品相比于实测数据在空间上精度更高, 相比于遥感卫星数据时间序列更长(Jiao等, 2021). 但在不同时空尺度适用性存在显著差异, 不少研究已开展了气温(Mistry等, 2022)、土壤湿度(Naz等, 2020)等多套再分析数据在高原地区的适用性评估.

(ⅱ) 旱涝监测模拟. 旱涝评价结果的科学性和准确性是灾害预警和制定应对决策的关键, 主导了灾害事件后期的走向(Zargar等, 2011). 目前应用于青藏高原的评价指标包括基于站点监测数据的指标、光学遥感反演的指标以及综合旱涝监测指标三类. 近年来青藏高原干湿变化趋势问题备受关注. 可能由于目前很多研究基于降水反映干湿状况, 所以大部分研究指出青藏高原自20世纪90年代开始呈湿润化趋势(Wang等, 2018; Tan等, 2018; Ayantobo等, 2022), 但该结果仍存在不确定性(Liu等, 2022). 例如, 利用自校准帕尔默干旱程度指数(scPDSI)的研究结果表明青藏高原近几十年呈明显的干旱化趋势, 尤其在高原北部地区(Cheng M等, 2023). 然而, SPI指数评价结果表明青藏高原干旱强度降低(Wang等, 2019). SPEI指数则表明干湿空间异质性较大, 青藏高原呈湿润趋势, 而周边地区呈干燥趋势. 这些基于站点监测的指标由于受观测站点数

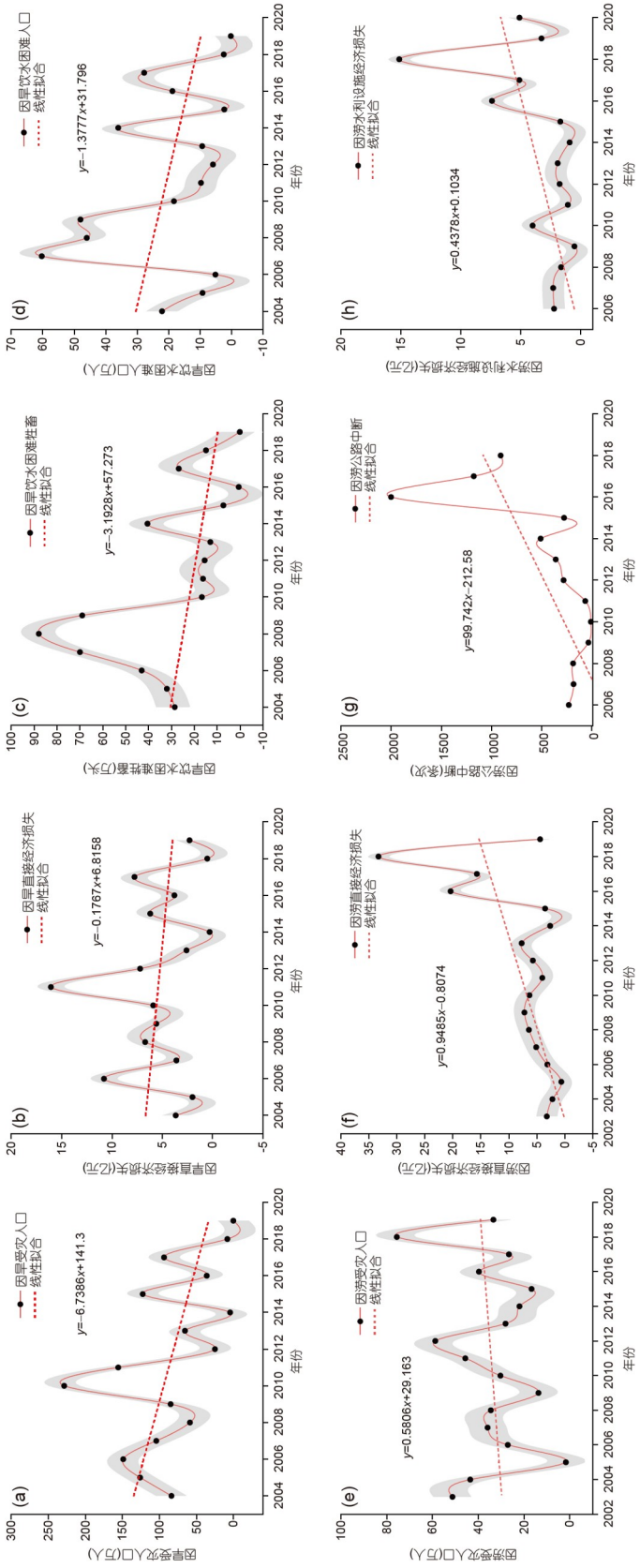

图 3　2004~2020年青藏高原旱涝灾情

按青海省和西藏自治区统计, 据《中国气象灾害年鉴》

量、空间分布的影响, 研究结果可靠性有待商榷.

为克服站点资料缺乏的不足, 近年来再分析和卫星数据集在评价中广泛应用. 多源时序合成孔径雷达(SAR)影像可进行冰湖分类提取和时序变化监测分析, 多用于冰湖溃坝型洪水的监测(Lu等, 2020). 基于光学遥感法的土壤湿度反演也可直接反映区域干湿状况. 研究表明, 反映土壤湿度状况的TVDI指数对下垫面复杂的青藏高原地区适用性好(Liu等, 2022). 基于多源观测和再分析土壤湿度数据的研究, 20世纪90年代中后期高原内陆和中西部突然转向湿润(Liu等, 2022). 还有研究应用ERA5再分析资料构建了日蒸散发差干旱指数(DEDI), 发现1979~2020年间高原西南部、东南部和北部地区总体比较干旱, 而高原中部、东部比较湿润(张霞等, 2022). 该结论与站点监测的相对湿度比较一致, 但站点监测的降水量呈增加趋势. 产生这一差异的原因是青藏高原升温背景下温度和水汽的复杂反馈作用影响其水量平衡, 也增强了高原干湿变化的不确定性(Zhang等, 2020).

综合旱涝监测指数是通过集成多源信息, 采用不同建模方法构建的. 魏杰和张鑫(2016)结合增强植被指数(EVI)和气象干旱综合监测指数(MCI)构建了干旱预警指数(DWI), 并应用于青藏高原地区, 监测精度比仅采用遥感数据的EVI从46.7%提高到了53.3%. Cheng Y等(2023)将降水、EVI和LST多个卫星数据产品应用嵌套Copulas法联合, 开发了新的综合遥感干旱指数(CRSDI), 量化了青藏高原上不同植被类型的气象和农业生态干旱, 补偿了离散台站监测的时空不连续性.

3.1.2 关键问题与研发路径

青藏高原属典型的缺资料地区, 气象水文要素监测精细化、时效性、立体化不足, 且现有的资料同化技术还不能很好地将卫星遥感、雷达探测和地面观测站等多源数据进行融合. 在旱涝监测模拟方面研究成果较多, 但所得结论不一致, 制约了对高原旱涝规律的认识. 旱涝灾害的本质是极端气象水文事件或水资源系统的极端场景, 水资源系统包括大气-地表-土壤-地下水等天然水循环过程与取水-输水-用水-耗水-排水-再生利用等社会水循环过程, 且不同要素和环节间存在着多向反馈作用(王浩和贾仰文, 2016). 以往干旱指标反映的大多是单一气象因子对干旱的影响或某一环节对干旱的反馈, 割裂了水循环系统的完整性. 因此, 在水资源系统视角下长系列、多尺度、综合性旱涝识别研究方法上还存在显著不足.

针对青藏高原气象水文要素监测方面的不足, 应综合考虑气候、水文、生态系统和地形地貌特征, 对相关要素过程开展长序列原型观测, 依托现有水文自动化监测系统和必要的人工补充监测, 提出基于原型观测、模型模拟的旱涝灾害精细化监测技术方案, 着重构建集卫星遥感、无人机和地面灾情调查数据等相结合的空天地一体化全域覆盖观测与信息获取体系, 在收集数据的同时也应加强数据加工和质量评估. 此外, 灾情数据是进行风险评估的基础, 应基于大数据采集技术收集旱涝灾情关键数据, 结合地理信息系统空间化的方法, 对各种社会经济、生态系统数据进行空间展布, 实现旱涝灾情关键数据集成.

青藏高原水循环包括降水、冰川积雪融水以及土壤冻融等复杂相态变化过程, 且作为“亚洲水塔”, 是下游的重要水源地. 因此应以水循环过程为主线, 解析大气水汽通量, 对赋存于地表、土壤和地下含水层中的水分及属性特征进行精细量化识别, 开展青藏高原广义水资源评价, 重点量化青藏高原区的“水塔”作用(Yao等, 2022), 即水塔出口下泄水对下游地区补给的水资源量. 在此基础上充分融合具有物理机制的水文模型和极值统计理论, 从水资源系统视角出发, 结合水资源供需动态平衡关系, 构建适用于青藏高原水资源系统视角下的旱涝识别技术. 此外, 旱涝遭遇特征识别是解决区域内有限水资源合理分配的重要途径. 因此需构建旱涝遭遇特性评价模型, 并探究青藏高原与下游区域水资源互补的可能性, 洪涝时吸水蓄水, 干旱时将蓄存的水释放出来, 实现“弹性适应”环境变化与自然灾害的目的(图4).

3.2 旱涝预报预警

3.2.1 研究进展

(ⅰ) 旱涝预测. 青藏高原旱涝预测在早期研究中主要以统计学方法为主. 已有研究分析了青海省SPI与74个环流特征量、海温、北半球500hPa高度场以及500hPa高度场遥相关因子之间的相关关系, 寻找先兆预报因子, 并应用逐步回归法建立干旱预报模型, 模拟准确率达87.5%. 结果表明, 当冬季印度副高北界偏弱、4月西太平洋型偏强时, 青海省容易发生夏旱(戴升等, 2013). 应用多元线性回归法构建的预测模型则

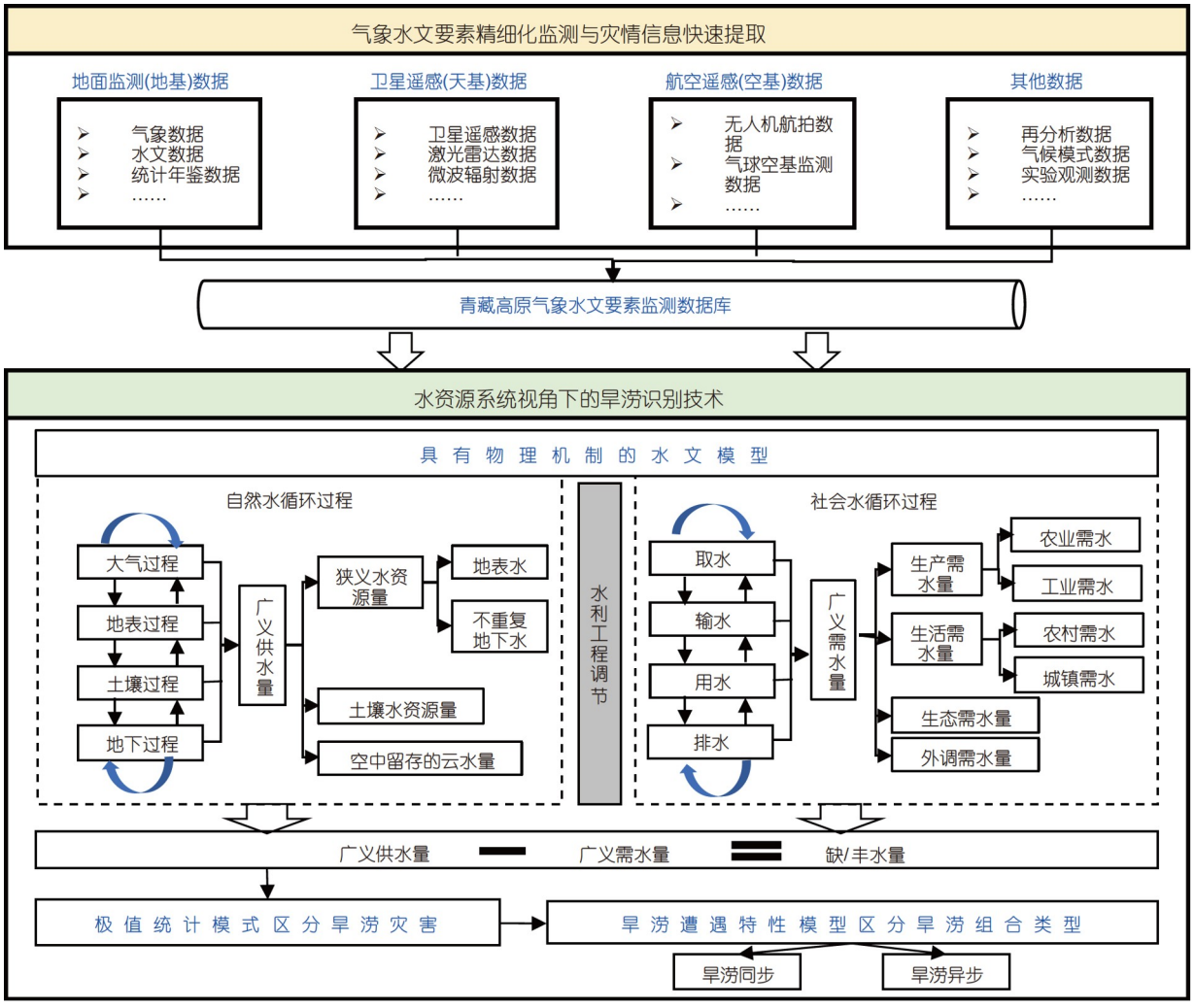

图 4　青藏高原水资源系统视角下的旱涝识别技术

表明欧亚及亚洲经向环流、大西洋及北非副高、北半球极涡和西藏高原位势高度为西南地区秋旱的显著强信号(吕纯月等, 2021). 针对冰湖溃坝型洪水, 研究对西藏喜马拉雅山地区29个冰湖样本进行逻辑回归分析, 并取得较好的预测效果(Wang等, 2016). 统计学方法虽然考虑了物理变量对旱涝的影响, 但青藏高原旱涝事件具有明显的复杂性和特殊性, 在预测过程中依然存在物理机制不明确和在气候变化下预报量与预报因子统计关系不稳健的问题(李颖等, 2022).

耦合气候模式和旱涝指标是预估未来旱涝事件变化趋势的主要方法(Wang T等, 2021). 世界气候研究计划发起的耦合模式比较计划第六阶段(CMIP6)为未来气候变化影响下的极端水文事件预估奠定了数据基础, 但气候模式对青藏高原模拟不确定性大, 不同气候模式尤其在高寒高原区适用性还需进一步探讨(高艳红等, 2022). 近两年, 学者们采用单个或多个CMIP6模式集合计算旱涝指数, 预估青藏高原旱涝事件的演变趋势(Chen等, 2021; Dong Z等, 2022). 研究一致认为青藏高原未来气温和降水均呈增加趋势, 只是不同气候模式变化幅度有差异, 尤其是降水变化的时空分布不均匀, 导致未来不同情景下季节性、区域性旱涝不确定性较大. SPEI指数预估未来干旱程度将加重, 而SPI指数表明干旱程度将减轻, 反映了增温将会加剧干旱的结论(张玉静, 2017).

由于气候系统具有内部自然变率、模式结构与参数化方案等不确定性, 单个气候模式不能准确模拟区

域尺度未来气候变化，多模式集合可以有效减少单一气候模式的系统偏差(Herger等，2018). 气候模式的选择及其关键气候要素的模拟精度显著影响各水文分量的模拟和旱涝预估结果(Yang等，2020). 因此，如何优选适用于青藏高原的模式数据、如何通过多模式集合提高CMIP6气候模式在青藏高原的模拟精度并降低预估结果的不确定性, 已成为迫切需要解决的问题, 也是准确预估未来极端水文事件变化趋势的基础. 随着大数据采集技术的发展，耦合机器学习和气候模式进行极端水文的预测已成为新趋势. 有研究采用随机森林(RF)、极限梯度增强(XGB)、卷积神经网络(CNN)和长时间短时记忆(LSTM)四种机器学习模型, 将各种气候变量组合作为预测因子，对1980~2019年青藏高原SPEI指数进行预测，效果较好，未来需考虑更多的预测因子，如大气环流、自然变率和人为活动，以更好地理解旱涝机制并提高气候预测的精度(Mokhtar等，2021).

(ⅱ) 旱涝预警. 青藏高原旱涝灾害往往带来严重的人员伤亡和财产损失，而科学的灾害预警体系能够有效降低灾害风险(张楚汉等, 2022). 旱涝灾害预报预警系统包括模拟推演、预报预警通讯、实时可视化展示等功能，关键在于将推演信息以警报的方式发送给管理者和风险区人群. 目前青藏高原灾害预警相关研究成果大多集中于由强降水导致的次生地质灾害预警方面，对干旱预警的研究较少. 联合国国际减灾战略处也表示干旱预警系统远比其他水文-气象灾害预警系统复杂得多，主要受各月、每季降雨观测方式、径流、地下水位、积雪等监测要素的影响(周寒，2019).

山洪是青藏高原洪涝灾害的主要表现形式，其形成与降雨强度、下垫面条件和土壤水分含量密切相关. 在山洪降雨预警指标的选取上主要采用数据驱动的统计归纳法和基于物理机理的水力学方法确定(Zhao等，2018). 朱平(2019)针对青海高原致灾性对流天气建立了高原上降水量预报方程，提出了高原上卫星和雷达综合观测的强对流潜势预警方法和算法. 但所用方法涉及到了临界值计算，计算指标在选择时仍有一定的主观性. 因此，未来应结合数值预报资料研究更长时效的旱涝预警方法，使用机器学习或其他智能方法自动筛选相关参数. 此外，还有必要建立一套科学合理的旱涝预报预警检验方法和业务系统.

3.2.2　关键问题与研发路径

青藏高原旱涝预报预警的能力和水平不能满足精细化预报业务发展的需求，时效性、预见期和精度亟待提高. 一方面，青藏高原大地形影响下的灾害形成过程理论基础有待进一步发展完善；另一方面，基于动力和统计的传统旱涝预测方法预报能力有限，且不确定性大，应充分融合全球气候模式和人工智能、机器学习等新一代信息技术构建动力-统计相结合的旱涝预测预警模型.

明晰青藏高原旱涝灾害发生机理可更好进行旱涝预报预警, 对防灾减灾意义重大. 青藏高原旱涝灾害受气候变化和人类活动的共同作用，同时两者间也存在能量反馈作用. 青藏高原的水利工程密度相对较低，对天然水循环过程大幅改造程度和干扰作用相对较弱，区域天然生态能够适应旱涝的自然节律(Liu等，2020); 但在人为气候变化影响下旱涝的自然节律发生了变化，重点应解析人类活动对旱涝极端水文事件的影响. 因此，应融合气候变化、水利工程调节、下垫面变化、人类活动干扰信息，对各驱动因子采用地理探测器、数字信号处理等方式进行整体识别. 目前对旱涝事件的观测多反映了土地利用变化、灌溉及水利工程的调节作用，因此需厘清如何将旱涝观测结果还原到天然状态的问题，实现气候变化和人类活动对极值事件的定量分离. 但在温升背景下，高原陆面水文循环过程受到不同程度的影响，其背后的冰川积雪融水、土壤冻融等复杂相态变化机制有待揭示，这使得旱涝变化天然状态还原难度增加.

机器学习的最大优势在于从“大数据”中挖掘信息以预测未来，未来应将动力模式和机器学习相结合构建青藏高原动力-统计模型进行旱涝预测. 根据青藏高原致灾机理, 在上述驱动因子识别基础上, 选取与旱涝指标相关度高的变量作为预测因子，将旱涝指数作为预测目标，采用机器学习算法提取大气变量和旱涝之间的统计关系，以多模式集合后的气候模式预报数据驱动模型，并利用人工智能建模和仿真技术，搭建包含全要素过程和场景可视化功能的青藏高原旱涝场景推演平台，实现青藏高原动力与统计相结合的旱涝预测模型和场景推演平台的构建.

针对旱涝预警，首先应从旱涝监测和预测信息中充分挖掘当前的旱涝特性和状态、潜在灾害损失等,

将其作为灾情数据集. 辨析预警等级与社会属性等各变量状态的关系, 利用数值统计方法建立关联因素矩阵及社会属性各变量状态转移矩阵, 例如针对特定的社会属性, 在旱涝灾损程度达到多少时, 应转为Ⅱ级或更高等级的预警, 以进一步揭示不同等级预警的一般性规律. 最后在不同等级预警搭接阈进行模拟分析评估基础上发布相应的预警信息. 此外, 还要在青藏高原案例实证研究中反复对其机制机理和模型方法做进一步的修正和完善(图5).

3.3 旱涝风险防控与应急处置

3.3.1 研究进展

(ⅰ) 风险评估. 高原变暖加剧了极端水文事件的发生, 给自然生态系统和人工生态系统带来极大风险, 风险评估是实现灾害危机管理向风险管理过渡的前提. 青藏高原旱灾相关研究主要以农牧业、草地为对象, 基于区域灾害系统理论构建风险评估模型. 例如, 基于灾害系统评价指标的研究表明, 干旱风险高值区主要分布在青藏高原东部农业区和青海南部牧业区, 且农区干旱风险普遍高于牧区(Chen等, 2019). 同时, 干旱对青藏高原草原生态系统也产生了直接威胁, 高风险区位于高原西南部, 主要由高敏感性和脆弱性决定. 从高原野外控制实验和水分收支情况看, 其高寒草原生态系统碳通量净交换的能力要弱于草甸生态系统, 即高寒草原面临的干旱风险比高寒草甸更高(Ding等, 2017).

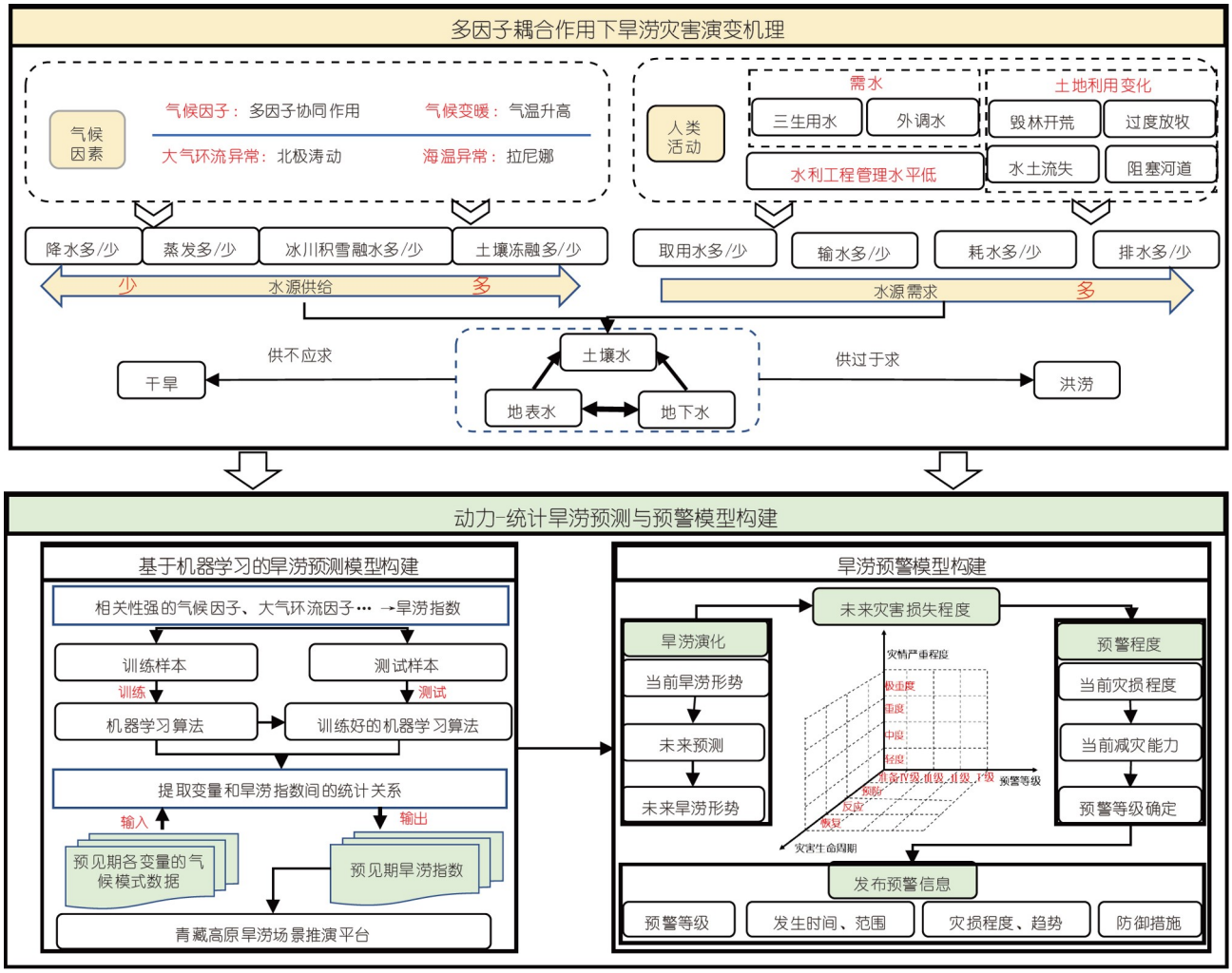

图 5 青藏高原旱涝灾害预报预警技术

未来几十年, 青藏高原冰湖溃决风险将增加, 在中国境内具有极高危险性的冰湖有30个, 集中分布在喜马拉雅山中段的吉隆县、聂拉木县和定日县(Allen等, 2019). Ding等(2020)基于遥感和地质考察信息, 采用回归模型和数值模拟方法对高原冰湖多年动态演化特征和溃决风险进行了评价, 结果表明东措渠冰湖大坝溃坝风险概率为0.39, 溃坝风险程度达到Ⅰ级, 为中度危险、严重损失. 由于流经川藏铁路拟建位置, 可为降低川藏铁路建设风险提供良好参考. 基于灾害系统论的研究结果表明溃决洪水高风险区集中在喜马拉雅山脉中部、念青唐古拉山中东部和唐古拉山南部, 其风险区划结果与历史灾害点分布一致(Wang等, 2020). 高危堰塞湖对周围的生态有很强的破坏力, 必须预警防控. 但如果堰塞湖不发生溃决则会对生态环境产生一定的积极作用, 特别是在一些水土流失严重的地区, 区域生境质量稳步提高(Jiang等, 2022).

(ⅱ) 风险防控与应急处置. 完善的风险防控与应急处置体系, 可有效延长旱涝灾害的应急响应与逃生避险的时间, 降低灾害损失. 青藏高原旱涝风险管控思路是基于灾害成灾机理, 通过工程和非工程措施以及各部门联防联控理念, 对灾害进行全过程防范、减缓或规避(王世金等, 2021). 研究指出应针对性地进行灾害考察, 利用高新技术系统建立灾害数据库. 在此基础上开展高原灾害危险性评估和风险分析, 加强灾害预警体系建设、临灾预案实施、灾害管理与技术队伍建设(崔鹏等, 2019). 例如针对突发性强的洪涝灾害关键是要加强灾害监测, 特别是加快边坡破坏、筑坝过程和预期洪水的预测模型的构建. 其中结合遥感与现场监测信息对潜在灾害点进行连续监测预警, 可显著降低次生灾害发生风险(Yang等, 2020). 需要指出的是, 风险管理应强调和聚焦高风险区域, 根据严重和紧急程度, 分批、分阶段提出风险防控方案.

降低承载体暴露度也可达到风险防控的目的. 例如, 针对重大工程要重视灾害勘察, 判识潜在风险, 从工程规划和设计源头上避免和减轻灾害; 针对草原生态系统, 应根据水热、土壤、草地生产力等因素, 评估草场承载力, 确定合理的草地载畜量, 缓解畜草矛盾, 保障牧业发展(崔鹏等, 2015); 针对冰湖溃坝洪水, 合理的减湖、加固冰碛坝等工程措施是缓解或控制风险最有效或最直接的方法, 但工程措施投资过大, 未来还要侧重于转移灾区居民, 并强调形成信息共享、资源共享、统一协调、责任分工的多方防灾减灾联动机制(Wang等, 2020).

3.3.2　关键问题与研发路径

青藏高原旱涝灾害的形成发展过程中, 各灾害要素间存在复杂的链式传导机制, 形成气象-水文-生态-社会经济风险演化的复杂网络系统. 科学认识极端水文事件链式传导机制并寻找风险阻断点进行断链减灾是保障区域水安全和生态安全的关键难题. 过去风险防控应对措施处置对象较单一, 针对性不强, 青藏高原作为重要的生态安全屏障, 未能充分发挥自然力的作用.

青藏高原旱涝链式传导机制是断链减灾的理论基础. 应从灾害系统论角度出发, 针对致灾因子、孕灾环境、承灾体三方面解析灾害链多要素耦合作用机理, 根据灾害发生的主要环节, 辨识灾害激发阈值. 由图6可知致灾因子达到临界致灾阈值时, 在不同孕灾环境下易发生不同类型的灾害; 当达到脆弱性指标阈值时则会影响范围内的承灾体, 最终导致灾情的发生(叶丽梅等, 2018). 因此, 实现灾害断链减灾有两个关键点, 一是确定致灾临界条件, 二是确定脆弱性指标阈值. 在此基础上制定极限状态预警响应体系, 及时有针对性地采取预防措施, 切断灾害要素或环节间的主要联系, 可防止或减缓次生灾害的发生发展.

区域供需水失衡是诱发灾害发生的主要原因. 首先, 探析青藏高原供用水响应变化规律, 从极端水文事件的发生、发展、恢复等过程角度出发, 明晰供用水失衡发生条件及临界阈值, 实现致灾临界点的识别. 其次, 考虑承灾体对抗灾害时的弹性, 建立水量、灾害历时、烈度等与财产灾害损失率/通行速度衰减/人口受灾率/生态破坏程度等的关系曲线, 确定承载体脆弱性阈值. 最后, 通过与生态系统数据和城市内涝、农牧业经济损失数据进行空间地理关系拓扑叠加, 实现旱涝风险综合阈值确定与区划.

在上述旱涝灾害风险阻断点识别和分区的基础上, 采取适应与调控相结合的思路实现青藏高原旱涝极值事件的综合应对. 致灾临界风险阻断点主要侧重于调控, 尽量防止旱涝事件发生; 若已发生则需要通过优化社会经济发展空间布局等措施降低灾害损失, 因此脆弱性阈值点处侧重主动适应. 过去干旱调控主要通过跨流域调水、开源节流等方式, 洪涝调控主要

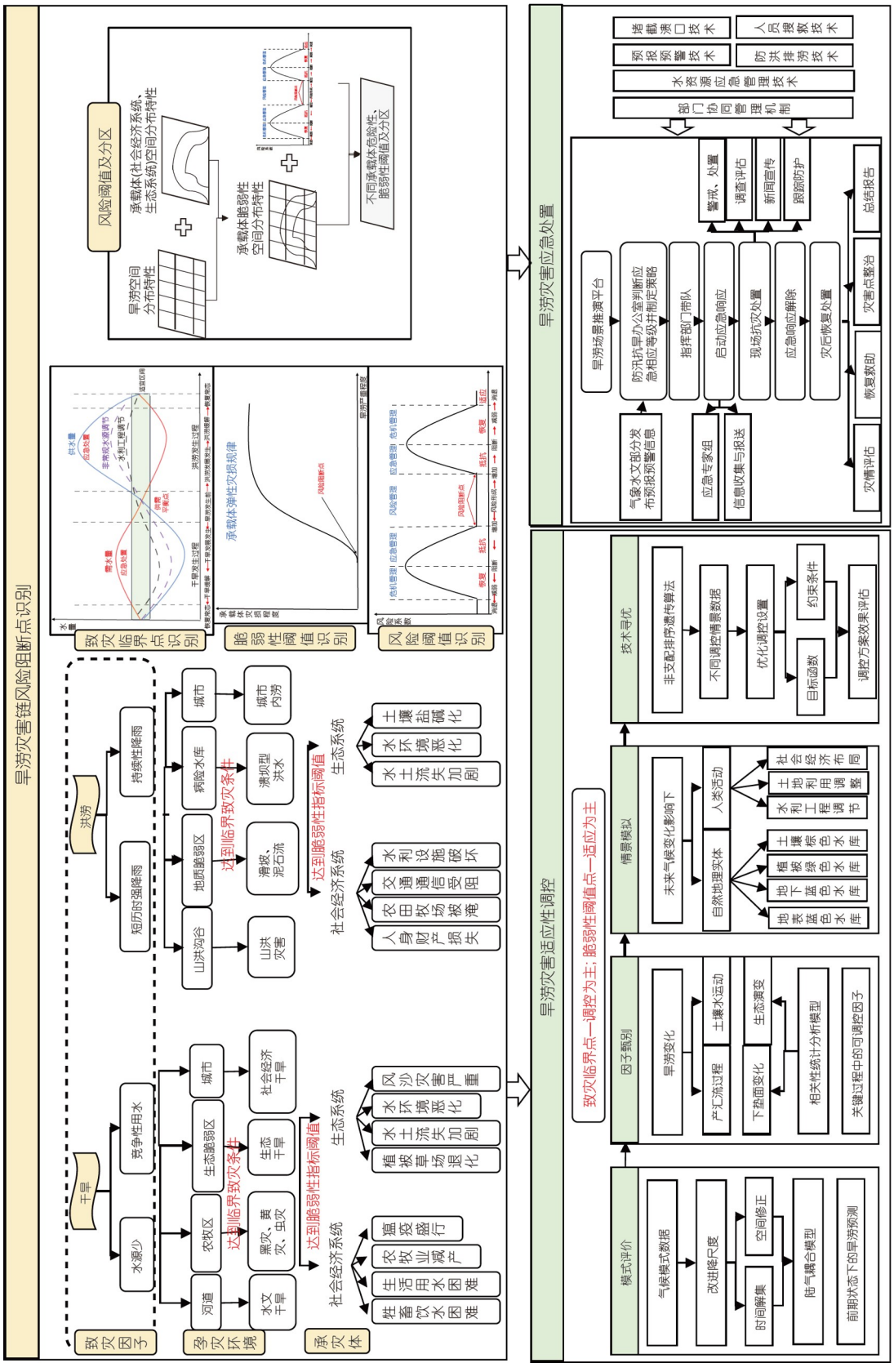

图 6　青藏高原旱涝风险防控与应急处置技术

通过水库蓄水、渠道排水等, 这种应对模式未能遵循天然水循环的大气-地表-土壤-地下全要素过程. 青藏高原作为重要的生态安全屏障, 应注重生态化防灾, 即通过工程和非工程措施充分发挥生态系统自然力的作用, 实现对水循环多过程间的调节. 例如, 地表单元上的植被和湿地可调节水量, 增强水土保持功能; 土壤可提高土体单元有效降水蓄存量; 地下水可坦化降水极值过程, 蓄丰补枯; 在流域降水再分配及旱涝灾害孕育过程中均发挥着重要作用. 因此, 着眼于青藏高原旱涝形成过程的特殊性, 按照"模式评价→因子甄别→情景模拟→技术寻优"进行旱涝适应性调控.

气候变化改变了青藏高原水热平衡状态, 影响旱涝极值事件的时空分布格局, 因此需明晰不同气候模式下的极值变化特征. 基于产汇流过程、土壤水运动过程、下垫面变化以及生态因子与旱涝变化之间的互馈关系, 识别量化各因子对旱涝灾害的贡献率, 遴选主导性驱动因子, 统筹水循环垂直和水平尺度各环节间的关系, 甄别关键过程中可调控的要素及程度. 在此基础上, 综合考虑自然地理实体、人类对水资源的开发利用活动及水利工程等, 通过设置不同调控情景, 确定调控最佳方案, 最大限度"去极值化".

在灾害应急处置方面, 加强政府部门间的协同管理尤为必要, 应成立防汛抗旱应急指挥管理部, 明确各级各有关部门抢险职责, 建立完善信息共享、会商研判、联动协同、综合决策的工作协调机制, 将气象水文部门的预测、预防、预报与应急管理部门的抗灾、救援有机衔接, 确保发布灾害应急响应时, 能快速及时处置. 在响应中止后从预报、决策、处置、信息反馈、恢复等环节不断优化旱涝应急管理机制, 以提高社会经济系统和生态系统的韧弹性(图6).

4　结论

青藏高原对中国长期的水安全、生态安全保障具有战略意义. 但该区极端旱涝灾害交替发生, 生态系统不稳定问题日渐凸显, 冰湖溃坝及融冰融雪性等新型洪涝灾害愈演愈烈. 面向青藏高原旱涝新情势下灾害防御的要求, 针对目前青藏高原旱涝灾害驱动机制不明晰、多源数据融合不足、预报预警精度低和风险防控措施针对性不强的问题, 提出了水资源系统视角下的旱涝演变规律及遭遇特性识别方法, 改进了耦合数值模拟与知识挖掘的旱涝预测预警模式, 构建了基于灾害链的旱涝风险阻断点识别与适应性调控技术框架, 为提高青藏高原及下游地区的水旱灾害防治、水资源保护、生态修复及气候变化应对提供技术支撑.

参考文献

崔鹏, 郭晓军, 姜天海, 张国涛, 靳文. 2019. "亚洲水塔"变化的灾害效应与减灾对策. 中国科学院院刊, 34: 1313–1321

崔鹏, 苏凤环, 邹强, 陈宁生, 张镱锂. 2015. 青藏高原山地灾害和气象灾害风险评估与减灾对策. 科学通报, 60: 3067–3077

戴升, 李林, 刘彩红. 2013. 青海省夏季干旱特征及其预测模型研究. 冰川冻土, 689–698

高艳红, 许建伟, 张萌, 刘朝阳, 但婧瑜. 2022. 青藏高原气候动力降尺度——从1/4度到公里尺度. 中国科学: 地球科学, 52: 2342–2352

胡春宏, 郑春苗, 王光谦, 张建云, 王超, 姚檀栋, 王焰新, 赖明勇, 倪广恒, 王雨春, 张弛, 田富强. 2022. "西南河流源区径流变化和适应性利用"重大研究计划进展综述. 水科学进展, 33: 337–359

康世昌, 郭万钦, 吴通华, 钟歆玥, 陈仁升, 许民, 陈金雷, 杨瑞敏. 2020. "一带一路"区域冰冻圈变化及其对水资源的影响. 地球科学进展, 35: 1–17

李颖, 苏凤阁, 汤秋鸿, 高红凯, 严登华, 彭辉, 肖尚斌. 2022. 青藏高原主要流域的降水水汽来源. 中国科学: 地球科学, 52: 1328–1344

吕纯月, 管兆勇, 黄垭飞. 2021. 1961~2018年西南地区夏季干旱变化特征及其与环流异常的联系. 大气科学学报, 44: 573–584

彭振华, 李艳忠, 余文君, 星寅聪, 冯爱青, 杜深文. 2021. 遥感降水产品在中国不同气候区的适用性研究. 地球信息科学学报, 23: 1296–1311

王浩, 贾仰文. 2016. 变化中的流域"自然-社会"二元水循环理论与研究方法. 水利学报, 47: 1219–1226

王世金, 魏彦强, 牛春华, 张云飞. 2021. 青藏高原多灾种自然灾害综合风险管理. 冰川冻土, 43: 1848–1860

魏杰, 张鑫. 2016. 气象干旱综合监测指数适用性分析——以青海省东部农业区为例. 中国农村水利水电, (6): 81–85, 89

温克刚, 刘光轩. 2007. 中国气象灾害大典 西藏卷. 北京: 气象出版社

温克刚, 王莘. 2007. 中国气象灾害大典 青海卷. 北京: 气象出版社

吴红宝, 高清竹, 干珠扎布, 李钰, 闫玉龙, 胡国铮, 王学霞, 严俊, 何世丞. 2019. 放牧和模拟增温对藏北高寒草地植物群落特征及生产力的影响. 植物生态学报, 43: 853–862

姚檀栋, 余武生, 邬光剑, 徐柏青, 杨威, 赵华标, 王伟财, 李生海, 王宁练, 李忠勤, 刘时银, 游超. 2019. 青藏高原及周边地区近期冰川状态失常与灾变风险. 科学通报, 64: 2770–2782

叶丽梅, 周月华, 周悦, 牛奔. 2018. 暴雨洪涝灾害链实例分析及断链

减灾框架构建. 灾害学, 33: 65–70
张楚汉, 王光谦, 李铁键. 2022. 变化环境下城市暴雨致灾防御对策与建议. 中国科学院院刊, 37: 1126–1131
张霞, 段亚雯, 段建平, 蹇东南, 马柱国. 2022. 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, 52: 540–558
张玉静. 2017. PRECIS对中国区域极端气候事件的高分辨率数值模拟与预估. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院. 1–147
中国气象局. 2004–2020. 中国气象灾害年鉴. 北京: 气象出版社
周寒. 2019. 干旱风险评估及监测预警模式探讨. 地下水, 41: 156–178
朱平. 2019. 青海高原致灾性对流天气遥感监测及预警方法研究. 博士学位论文. 南京: 南京信息工程大学. 1–168
Allen S K, Zhang G Q, Wang W C, Yao T D, Bolch T. 2019. Potentially dangerous glacial lakes across the Tibetan Plateau revealed using a large-scale automated assessment approach. Sci Bull, 64: 435–445
Ayantobo O O, Wei J, Li Q, Hou M, Wang G. 2022. Moderate rain intensity increased and contributes significantly to total rain change in recent decades over the Qinghai-Tibet Plateau. J Hydrol-Reg Stud, 39: 100984
Chen L, Wang G, Miao L, Gnyawali K R, Li S, Amankwah S O Y, Huang J, Lu J, Zhan M. 2021. Future drought in CMIP6 projections and the socioeconomic impacts in China. Intl J Climatol, 41: 4151–4170
Chen Q, Liu F G, Chen R J. 2019. Trends and risk evolution of drought disasters in Tibet region, China. J Geogr Sci, 29: 1859–1875
Cheng M, Zhong L, Ma Y, Wang X, Li P, Wang Z, Qi Y. 2023. A new drought monitoring index on the Tibetan Plateau based on multisource data and machine learning methods. Remote Sens, 15: 512
Cheng Y, Zhang K, Chao L, Shi W, Feng J, Li Y. 2023. A comprehensive drought index based on remote sensing data and nested copulas for monitoring meteorological and agroecological droughts: A case study on the Qinghai-Tibet Plateau. Environ Model Software, 161: 105629
Ding J Z, Chen L Y, Ji C J, Hugelius G, Li Y N, Liu L, Qin S Q, Zhang B B, Yang G B, Li F, Fang K, Chen Y L, Peng Y F, Zhao X, He H L, Smith P, Fang J Y, Yang Y H. 2017. Decadal soil carbon accumulation across Tibetan permafrost regions. Nat Geosci, 10: 420–424
Ding M, Gao Z, Huang T, Hu X. 2020. The hazard assessment of glacial lake debris flow: A case study on Dongcuoqu, Luolong County, Tibet. IOP Conf Ser: Earth Environ Sci, 570: 042054
Dong N, Xu X, Cai W, Zhao T L, Sun C. 2022. Comprehensive effects of interdecadal change of sea surface temperature increase in the Indo-Pacific Ocean on the warming-wetting of the Qinghai-Tibet Plateau. Sci Rep, 12: 22306
Dong Z, Liu H, Baiyinbaoligao H, Hu H, Khan M Y A, Wen J, Chen L, Tian F. 2022. Future projection of seasonal drought characteristics using CMIP6 in the Lancang-Mekong River Basin. J Hydrol, 610: 127815
Feng W, Lu H, Yao T, Yu Q. 2020. Drought characteristics and its elevation dependence in the Qinghai-Tibet Plateau during the last half-century. Sci Rep, 10: 14323
Gao J, Yao T, Masson-Delmotte V, Steen-Larsen H C, Wang W. 2019. Collapsing glaciers threaten Asia's water supplies. Nature, 565: 19–21
Hagg W, Hoelzle M, Wagner S, Mayr E, Klose Z. 2013. Glacier and runoff changes in the Rukhk catchment, upper Amu-Darya basin until 2050. Glob Planet Change, 110: 62–73
He S, Richards K S. 2015. Impact of meadow degradation on soil water status and pasture management—A case study in Tibet. Land Degrad Dev, 26: 468–479
Herger N, Abramowitz G, Knutti R, Angélil O, Lehmann K, Sanderson B M. 2018. Selecting a climate model subset to optimise key ensemble properties. Earth Syst Dynam, 9: 135–151
Huss M, Hock R. 2018. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. Nat Clim Change, 8: 135–140
Jacob T, Wahr J, Pfeffer W T, Swenson S. 2012. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. Nature, 482: 514–518
Jiang F, Dai X, Xie Z, Xu T, Yin S, Qu G, Yang S, Zhang Y, Yang Z, Xu J, Hou Z. 2022. Flood inundation evolution of barrier lake and evaluation of regional ecological spatiotemporal response—A case study of Sichuan-Tibet region. Environ Sci Pollut Res, 29: 71290–71310
Jiao D, Xu N, Yang F, Xu K. 2021. Evaluation of spatial-temporal variation performance of ERA5 precipitation data in China. Sci Rep, 11: 17956
Li Z, Wang Z, Liu X, Fath B D, Liu X, Xu Y, Hutjes R, Kroeze C. 2019. Causal relationship in the interaction between land cover change and underlying surface climate in the grassland ecosystems in China. Sci Total Environ, 647: 1080–1087
Liu S, Wu T, Wang X, Wu X, Yao X, Liu Q, Zhang Y, Wei J, Zhu X. 2021. Changes in the global cryosphere and their impacts: A review and new perspective. Sci Cold Arid Reg, 12: 343–354
Liu Y, Liu Y, Wang W, Zhou H, Tian L. 2022. Historical droughts manifest an abrupt shift to a wetter Tibetan Plateau. Hydrol Earth Syst Sci, 26: 3825–3845
Liu Y, Ni Z, Zhao Y, Zhou G, Luo Y, Li S, Wang D, Zhang S. 2022. Spatial-temporal evolution and driving forces of drying trends on the Qinghai-Tibet Plateau based on geomorphological division. Int J

Environ Res Public Health, 19: 7909

Liu Y, Song H, An Z, Sun C, Trouet V, Cai Q, Liu R, Leavitt S W, Song Y, Li Q, Fang C, Zhou W, Yang Y, Jin Z, Wang Y, Sun J, Mu X, Lei Y, Wang L, Li X, Ren M, Cui L, Zeng X. 2020. Recent anthropogenic curtailing of Yellow River runoff and sediment load is unprecedented over the past 500 y. Proc Natl Acad Sci USA, 117: 18251–18257

Lu P, Han J, Li Z, Xu R, Li R, Hao T, Qiao G. 2020. Lake outburst accelerated permafrost degradation on Qinghai-Tibet Plateau. Remote Sens Environ, 249: 112011

Mistry M N, Schneider R, Masselot P, Royé D, Armstrong B, Kyselý J, Orru H, Sera F, Tong S, Lavigne É, Urban A, Madureira J, García-León D, Ibarreta D, Ciscar J C, Feyen L, de Schrijver E, de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho M, Pascal M, Tobias A, Alahmad B, Abrutzky R, Saldiva P H N, Correa P M, Orteg N V, Kan H, Osorio S, Indermitte E, Jaakkola J J K, Ryti N, Schneider A, Huber V, Katsouyanni K, Analitis A, Entezari A, Mayvaneh F, Michelozzi P, de'Donato F, Hashizume M, Kim Y, Diaz M H, De la Cruz Valencia C, Overcenco A, Houthuijs D, Ameling C, Rao S, Seposo X, Nunes B, Holobaca I H, Kim H, Lee W, Íñiguez C, Forsberg B, Åström C, Ragettli M S, Guo Y L L, Chen B Y, Colistro V, Zanobetti A, Schwartz J, Dang T N, Van Dung D, Guo Y, Vicedo-Cabrera A M, Gasparrini A. 2022. Comparison of weather station and climate reanalysis data for modelling temperature-related mortality. Sci Rep, 12: 5178

Mokhtar A, Jalali M, He H, Al-Ansari N, Elbeltagi A, Alsafadi K, Abdo H G, Sammen S S, Gyasi-Agyei Y, Rodrigo-Comino J. 2021. Estimation of SPEI meteorological drought using machine learning algorithms. IEEE Access, 9: 65503–65523

Mondal S K, K. Mishra A, Leung R, Cook B. 2023. Global droughts connected by linkages between drought hubs. Nat Commun, 14: 144

Munawar H S, Hammad A W A, Waller S T. 2022. Remote sensing methods for flood prediction: A review. Sensors, 22: 960

Naz B S, Kollet S, Franssen H J H, Montzka C, Kurtz W. 2020. A 3 km spatially and temporally consistent European daily soil moisture reanalysis from 2000 to 2015. Sci Data, 7: 111

Ran Y, Li X, Cheng G. 2017. Climate warming has led to the degradation of permafrost stability in the past half century over the qinghai-tibet plateau. Cryosphere Discuss, 12: 1–30

Sattar A, Haritashya U K, Kargel J S, Karki A. 2022. Transition of a small Himalayan glacier lake outburst flood to a giant transborder flood and debris flow. Sci Rep, 12: 12421

Tan L, Cai Y, Cheng H, Edwards L R, Lan J, Zhang H, Li D, Ma L, Zhao P, Gao Y. 2018. High resolution monsoon precipitation changes on southeastern Tibetan Plateau over the past 2300 years. Quat Sci Rev, 195: 122–132

van Hoek M, Zhou J, Jia L, Lu J, Zheng C, Hu G, Menenti M. 2020. A prototype web-based analysis platform for drought monitoring and early warning. Int J Digital Earth, 13: 817–831

Wang H, Chen Y, Pan Y, Chen Z, Ren Z. 2019. Assessment of candidate distributions for SPI/SPEI and sensitivity of drought to climatic variables in China. Intl J Climatol, 39: 4392–4412

Wang S, Che Y, Xinggang M. 2020. Integrated risk assessment of glacier lake outburst flood (GLOF) disaster over the Qinghai-Tibetan Plateau (QTP). Landslides, 17: 2849–2863

Wang T, Tu X, Singh V P, Chen X, Lin K. 2021. Global data assessment and analysis of drought characteristics based on CMIP6. J Hydrol, 596: 126091

Wang X, Pang G, Yang M. 2018. Precipitation over the Tibetan Plateau during recent decades: A review based on observations and simulations. Int J Climatol, 38: 1116–1131

Wang Y W, Wang L, Zhou J, Yao T D, Yang W, Zhong X Y, Liu R S, Hu Z D, Luo L, Ye Q H, Chen N S, Ding H T. 2021. Vanishing glaciers at southeast Tibetan Plateau have not offset the declining runoff at Yarlung zangbo. Geophys Res Lett, 48: e2021GL094651

Wang Z F, Zhang T S, Wang C W. 2016. Prediction model and its application for glacial lake outburst in the Himalayas area, Tibet. J Glaciol Geocryol, 38: 388–394

Yang L, Ma J, Wang X, Tian F. 2022. Hydroclimatology and hydrometeorology of flooding over the Eastern Tibetan Plateau. J Geophys Res-Atmos, 127: e2022JD037097

Yang T H, Liu W C. 2020. A general overview of the risk-reduction strategies for floods and droughts. Sustainability, 12: 2687

Yang X, Zhang M, He X, Ren L, Pan M, Yu X, Wei Z, Sheffield J. 2020. Contrasting influences of human activities on hydrological drought regimes over China based on high resolution simulations. Water Resources Res, 56: e2019WR025843

Yao T D, Thompson L, Yang W, Yu W, Gao Y, Guo X, Yang X, Duan K, Zhao H, Xu B, Pu J, Lu A, Xiang Y, Kattel D B, Joswiak D. 2012. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nat Clim Change, 2: 663–667

Yao T, Bolch T, Chen D, Gao J, Immerzeel W, Piao S, Su F, Thompson L, Wada Y, Wang L, Wang T, Wu G, Xu B, Yang W, Zhang G, Zhao P. 2022. The imbalance of the Asian water tower. Nat Rev Earth Environ, 3: 618–632

Yao T, Thompson L, Chen D, Piao S. 2022. Reflections and future strategies for Third Pole Environment. Nat Rev Earth Environ, 3: 608–610

Yao T, Xue Y, Chen D, Chen F, Thompson L, Cui P, Koike T, Lau W K M, Lettenmaier D, Mosbrugger V, Zhang R, Xu B, Dozier J, Gillespie T, Gu Y, Kang S, Piao S, Sugimoto S, Ueno K, Wang L, Wang W, Zhang F, Sheng Y, Guo W, Ailikun W, Yang X, Ma Y,

Shen S S P, Su Z, Chen F, Liang S, Liu Y, Singh V P, Yang K, Yang D, Zhao X, Qian Y, Zhang Y, Li Q. 2019. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis. Bull Am Meteorol Soc, 100: 423–444

You Q, Chen D, Wu F, Pepin N, Cai Z, Ahrens B, Jiang Z, Wu Z, Kang S, AghaKouchak A. 2020. Elevation dependent warming over the Tibetan Plateau: Patterns, mechanisms and perspectives. Earth-Sci Rev, 210: 103349

You Q, Jiang Z, Yue X, Guo W, Liu Y, Cao J, Li W, Wu F, Cai Z, Zhu H, Li T, Liu Z, He J, Chen D, Pepin N, Zhai P. 2022. Recent frontiers of climate changes in East Asia at global warming of 1.5°C and 2°C. Npj Clim Atmos Sci, 5: 80

Zargar A, Sadiq R, Naser B, Khan F I. 2011. A review of drought indices. Environ Rev, 19: 333–349

Zhang G, Yao T, Xie H, Yang K, Zhu L, Shum C K, Bolch T, Yi S, Allen S, Jiang L, Chen W, Ke C. 2020. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: Trends, patterns, and mechanisms. Earth-Sci Rev, 208: 103269

Zhao K K, Peng D Z, Gu Y, Fan C T. 2018. The research status of flash flood warning in China. MATEC Web Conf, 246: 01072

(责任编委: 陈发虎)