中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 6 期： 2344–2359
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

金沙江下游梯级水库对地震活动影响的数值模拟研究

王子韬[1,2]，吴忠良[1,2]，张永仙[1,2*]，张怀[3]

1. 中国地震局地震预测研究所，北京 100036
2. 地震预测与风险评估应急管理部重点实验室，北京 100036
3. 地球系统数值模拟与应用全国重点实验室，中国科学院大学地球与行星科学学院，北京 101408
* 通讯作者，E-mail：yxzhseis@sina.com

2025-07-04收稿，2026-01-08修回，2026-03-06接受，2026-05-22网络版发表
国家自然科学基金项目(U2039207)和中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项项目(CEAIEF20230209)资助

摘要 金沙江下游地处中国西南部的川滇地区，西邻青藏高原，东接华南板块。该区域位于印度-欧亚板块相互碰撞挤压变形强烈地区，是中国大陆与周边板块动力传递的关键部位。区域内活动性断裂广泛发育，构造运动复杂，地震活动频发。自2012年起，金沙江下游先后建成4座大型水库，库区蓄水可能诱发局部构造应力场调整，进而影响区域地震活动性。本文基于金沙江流域水库水位变化与地质地球物理资料，利用数值模拟方法计算区域应力演化，探究孔隙压力变化规律，结合地震观测资料，分析区域地震活动性变化。研究结果表明，受水库水体载荷与孔隙流体压力的影响，金沙江下游及邻近区域的地表形变明显，水库近距离范围内的断裂带受孔隙压力扩散影响显著，其中大凉山断裂带局部区域孔隙压力增量峰值达100 kPa。库区周边断裂带库仑应力受水库蓄水影响显著，则木河断裂带、大凉山断裂带、小江断裂带、莲峰断裂带和烟峰断裂带的库仑应力增量超10 kPa的应力触发阈值，地震发生的可能性增加。库区地震活动特征受梯级水库蓄水影响明显，蓄水后地震频次显著增加，对走滑型和逆冲型断层的地震活动表现出明显的触发效应。因此对有长期运营需求的金沙江梯级水库，应重点关注水库及邻区地震活动变化与可能引发的链生灾害，该研究可为库区防震减灾工作提供一定的科学参考依据。

关键词 梯级水库，数值模拟，孔隙压力，库仑应力变化，地震活动

1 引言

金沙江流经中国青海、西藏、四川和云南四省，其下游地处青藏高原东南缘，位于川滇菱形块体东部。在欧亚板块与印度板块持续碰撞挤压的强烈作用下，青藏高原地壳和地幔物质发生侧向挤出，金沙江下游流域受其影响，地壳变形强烈，构造运动活跃。区域内活动断裂发育广泛，地震活动频繁，是5级以上地震的频发地区之一(图1)(Molnar和Tapponnier，1978；Tapponnier等，1982；Chen等，2000；Huang等，2002；邓起东等，2002，2003；Zhang等，2004；张国民等，2005；Royden等，2008；高金尉，2012；张培震等，2013；李碧雄等，2014；Liu等，2014；郭伟等，2022)。这一地区的地震活动不仅与深部构造运动密切相关，还受到地表河流侵蚀、地壳应力重新分布和水库蓄放水等多种因素的影响。

作为中国长江上游的金沙江，流急坎陡，水量稳定丰沛，落差达5100 m，技术可开发水能资源约8897万kW，水能资源富集，是中国最大的水电基地之一(汪东川等，2024；周乐群等，2025)。自21世纪初以来，金沙江下游规划并逐步建成了我国规模最大的梯级水电站工程，从上游至下游依次分布着乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝等大型水电站。梯级水电站的建设与运行为我国能源结构调整和经济社会发展提供了重要支撑。然而，大规模的水库蓄水也带来了潜在的地质风险。水库蓄水不仅

中文引用格式：王子韬, 吴忠良, 张永仙, 张怀. 2026. 金沙江下游梯级水库对地震活动影响的数值模拟研究. 中国科学: 地球科学, 56(6): 2344–2359, doi: 10.1360/SSTe-2025-0202
英文引用格式：Wang Z, Wu Z, Zhang Y, Zhang H. 2026. Effects of the cascade reservoirs in the lower Jinsha River on seismicity: Insights from numerical simulations. Science China Earth Sciences, 69(6): 2299–2314, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1897-6

© 2026《中国科学》杂志社

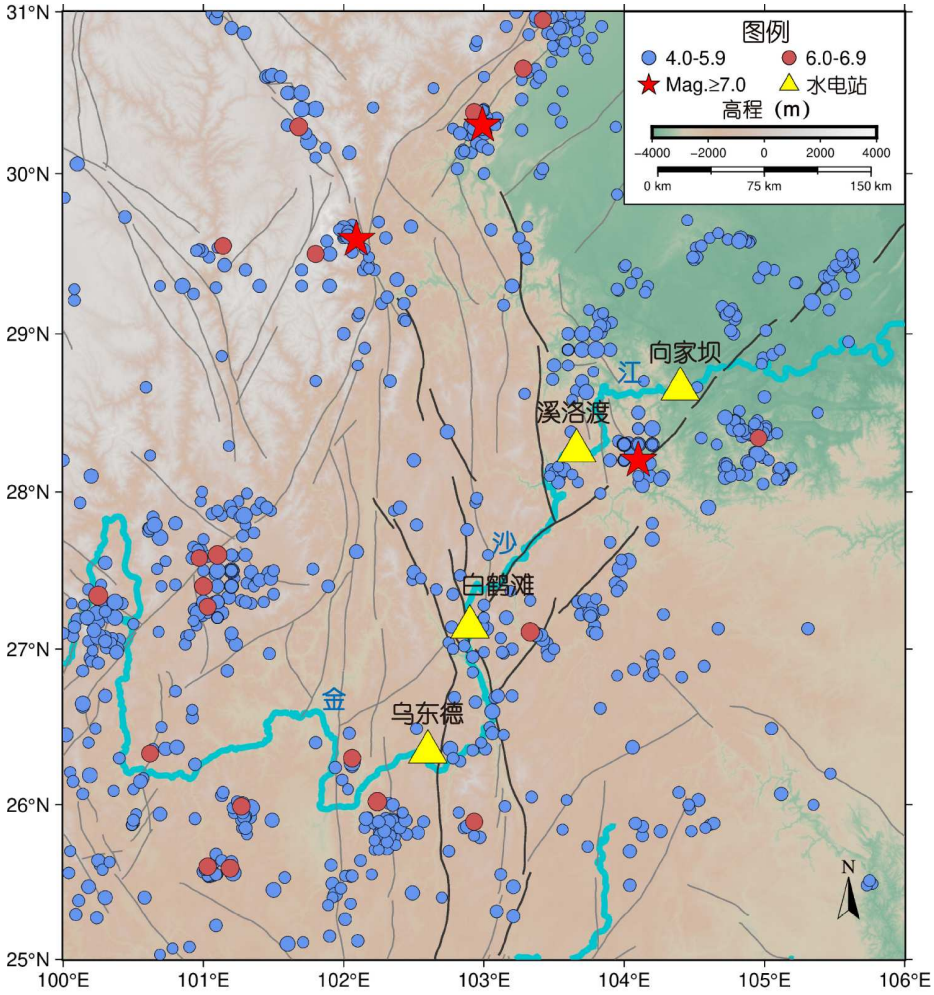


图1 金沙江下游梯级水库地质背景与历史地震活动分布。灰色实线为区域断层信息，本文重点研究断层以黑色实线突出显示(邓起东等，2003)，蓝色实线为金沙江分布，黄色三角形为梯级水库位置，不同颜色的圆点代表不同震级的地震信息，五角星为7级及以上地震信息(时间为1970年1月至2023年12月)(数据来自国家地震科学数据中心, https://data.earthquake.cn/)

会影响库区内岩石的物理性质，如应力场和断层强度等；水体化学作用还会使断层强度降低，进而诱发地震活动，这类地震通常被称为水库诱发地震(Lee和Raleigh，1969；Ge等，2009；Gupta等，2015)。

目前，全球已有140多个地区发生了水库诱发地震，尤以美国、印度和中国等地区最为集中(Talwani，1997；常廷改和胡晓，2018)。中国水利资源丰富，目前已建成各类水库超90000座。常廷改和胡晓(2018)对我国水库诱发地震进行统计发现，基本以有感地震(3.0<M_S<4.5)为主，1962年发生于广东省新丰江M_S6.1地震，破坏性极大，是中国历史上发生最早且破坏性最大的水库诱发地震(Chen和Talwani，1998)。西南地区是我国大型水库集中分布的区域，20世纪以来，该区域强震频率明显增加。因此，西部大规模的水电站工程的开展与周围区域震活动性的联系深受各界学者关注，其中2008年汶川M_W7.9地震的发生与其附近紫坪铺水库蓄水的联系成为研究的热点问题(Ge等，2009；Lei，2011；Klose，2012)。金沙江下游各个水电站库区相邻，蓄水时间相近，蓄水后的地震活动与蓄水时间的内在关系更为复杂，为区域未来地震活动危险性的分析带来了不小的难度与挑战。同时，四大水电站均位于曾发生过大震的地震带上，其中，溪洛渡和向家坝水电站位于马边-昭通地震带，历史上曾发生过7.1级地震(曹忠权等，1993)，乌东德和白鹤滩水电站地处东川-嵩明地震带，历史上曾发生过8级大震(黄圣睦，2003)。根据水库地震安全性评价结果，这些工程在设计阶段已充分考虑区域地震活动背景，并采取了相应的抗震设防措施。然而，鉴于大型水库蓄水可能改变局部应力场并影响断裂带活动性，水库诱发地震活动仍是众多学者关注的研究内容。

作为构造地震与诱发地震的高频发生区域，金沙江

下游地区成为研究水库蓄水诱发地震问题的天然“实验场”。随着计算机硬件及软件日新月异的进步，蓬勃发展的数值模拟为水库蓄水诱发地震的研究提供了强劲动力。越来越多的研究人员对水库蓄水诱发地震展开了定量计算，尝试通过定量计算区域应力和孔隙压力变化规律来探究水库蓄水活动对诱发地震产生的影响，得到诱发地震的发震机理(Ge等，2009；Lei，2011；程惠红等，2012；朱家正和孙玉军，2022)。目前基于孔隙弹性耦合理论，通过数值模拟和理论解析解等方法在研究水库地震的影响因素、应力触发阈值等问题上取得了较大进展。然而，现有研究多聚焦于单一水库蓄水所产生的影响，针对梯级水库联合作用的系统性研究仍相对缺乏。尹光耀等(2023)通过构建三维孔隙弹性耦合模型，探讨了溪洛渡和向家坝水库联合蓄水对区域地壳应力场和断层稳定性的影响，为该领域提供了有益参考。尽管如此，鉴于金沙江流域独特的构造应力场背景，以及梯级水库之间复杂的水力与力学相互作用，未来仍需采用分辨率更高、计算规模更大的数值模拟方法，以更精确地揭示其耦合机制与动力响应过程。深入探讨地壳运动、水库蓄水与地震活动之间的复杂关系，可为地震活动分析、灾害防治和水电工程安全提供科学依据。同时，金沙江下游流域的研究也对全球其他类似地质环境下的水库诱发地震问题具有重要的参考价值。

2　方法与模型

水库蓄水过程中，不断升高的水库水位会导致流体不断向库区下方地壳渗透，液体的渗透会引起地下孔隙压力的不断升高。同时，不断增大的水体载荷也会引起地下介质应力的不断变化。此外，水库建成后的长期使用以及地壳介质的黏滞性亦是影响地下介质应力的重要因素。因此，需以全耦合的孔隙-黏弹性方程来研究水库蓄水对地层应力的影响。根据储水引起的瞬时弹性响应和长时间尺度的黏性松弛效应，以孔隙-黏弹性本构方程描述更符合实际(Wang等，2024)：

$$\begin{aligned}\sigma_{ij}=&2\int_{-\infty}^{t}G(t-\xi)\frac{\partial\varepsilon_{ij}(\xi)}{\partial\xi}\mathrm{d}\xi\\&+\left\{\int_{-\infty}^{t}\left[K(t-\xi)-\frac{2}{3}G(t-\xi)\right]\frac{\partial\varepsilon_{kk}(\xi)}{\partial\xi}\mathrm{d}\xi\right\}\boldsymbol{\delta}_{ij}\\&+\left[-\frac{3(\upsilon_{\upsilon}-\upsilon)}{B(1+\upsilon)(1+\upsilon_{\upsilon})}p\right]\boldsymbol{\delta}_{ij}\end{aligned}\tag{1}$$

$$\kappa\nabla^2 p=\left[\frac{3(\upsilon_{\upsilon}-\upsilon)}{2GB(1+\upsilon)(1+\upsilon_{\upsilon})}\right]\frac{\partial}{\partial t}\left(\sigma_{kk}+\frac{3}{B}p\right)\tag{2}$$

其中，$\sigma_{kk}=\sigma_{11}+\sigma_{22}+\sigma_{33}$为黏弹性骨架应力，$p$为孔隙压力，$B$为Skempton系数，$\kappa$为渗透系数，$G$为剪切模量，$K$是体积模量，$\upsilon$是固体骨架的泊松比，$\upsilon_{\upsilon}$代表在不排水条件下骨架变形时的泊松比。

本文基于孔隙-黏弹性耦合理论，结合金沙江下游流域地质构造背景，通过建立三维有限元数值模型探究梯级水库间的相互影响。金沙江下游梯级水库位于川滇地块与华南块体的交界部位，各库区及邻区的活动断裂广泛发育(图2)，本次研究包含的主要断层有则木河断裂带(ZMHF)、大凉山断裂带(DLSF)、小江断裂带(XJF)、华蓥山-莲峰断裂带(HYS-LFF)、昭通-鲁甸断裂带(ZT-LDF)和普渡河断裂带(PDHF)。

根据金沙江下游流域四个梯级水库的分布位置，本文选取研究区范围为101°E–106°E，25°N–30°N，模型取至地表下100 km。金沙江下游流急坎陡，水量丰沛，地形多以高山峡谷为主，地势落差达5100 m。此类地形对梯级水库及邻区的形变场影响显著，因此有限元模型地表由SRTM30卫星地形数据插值得到。根据刘影等(2023)提供的SWChinaCVM-2.0，即中国川滇地区高分辨率公共速度模型2.0版，本文将模型分为四层，各层材料参数如表1所示，其中剪切模量G与体积模量K由速度结构信息计算(式(3)和(4))，各层黏滞系数根据Xu(2019)的川滇地区壳幔黏滞系数流变模型得出，地层岩石的Skempton系数B的取值一般在0.5–0.9之间，本文取值0.7(Rice和Cleary，1976；Talwani，1997)。模型四周与底面均设置为法向固定、切向自由的边界条件。由于不同断裂带的几何形态会影响多孔介质中的应力分布(Hui等，2021)，因此有限元模型中的断层结构需根据不同断裂带的几何形态添加(表2)。

$$G=\rho\cdot V_{\mathrm{s}}^2\tag{3}$$

$$K=\rho\cdot\left(V_{\mathrm{p}}^2-\frac{4}{3}V_{\mathrm{s}}^2\right)\tag{4}$$

其中，V_{s}与V_{p}分别为地震波的横波与纵波波速，ρ为地层岩石密度。

金沙江下游梯级水库白鹤滩、乌东德、溪洛渡和向家坝分别于2021年、2020年、2013年和2012年投入运行，白鹤滩水库蓄水时间最晚，于2021年4月开始蓄水，2021年11月水库上游水位稳定于800 m左右，自此四座梯级水库均完成蓄水操作(张天宇和刘自凤，2021；徐建荣等，2022)。本文以2012年1月为计算起点，计算了212年内位移与应力的演化过程，其中2012年1月至2023年12月，时间步长设置为一个月，详细计算水库蓄水后的初始弹性响应。自2024年1月开始至2224年12月止，时间步长调整为一年，研究水库在长时间尺度下的黏性松弛效应。自向家坝2012年开始蓄水以来，各水库水位稳步上升，目

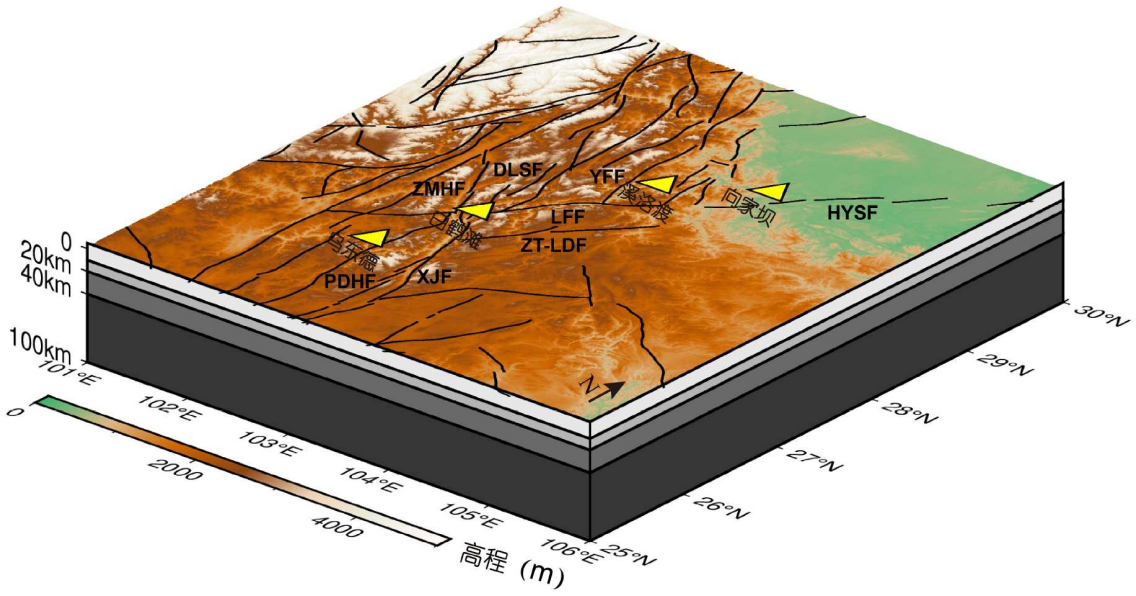


图2 三维有限元模型图。黑色实线为研究区断层信息，图中标出了本次研究重点分析断裂带的简称，分别为则木河断裂带(ZMHF)、大凉山断裂带(DLSF)、小江断裂带(XJF)、普渡河断裂带(PDHF)、莲峰断裂带(LFF)、华蓥山断裂带(HYSF)、昭通-鲁甸断裂带(ZT-LDF)和烟峰断裂带(YFF)。黄色三角形代表金沙江下游四个水库

表1 不同地层与断裂带材料参数

地层	厚度(km)	$K(10^{10}$ Pa)	G (10^{10} Pa)	η(N s m^{-2})	υ	υ_u	B	κ (10^{-6} m s kg^{-1})
1	>10	4.83	2.69	1×10^{23}	0.25	0.495	0.7	5
2	10	4.85	3.66	1×10^{23}	0.25	0.495	0.7	5
3	20	5.51	3.31	1×10^{22}	0.25	0.495	0.7	5
4	60	10.15	5.85	1×10^{21}	0.25	0.495	0.7	5
断裂带	–	4.83	2.69	1×10^{23}	0.25	0.495	0.7	5

前均已稳定于较高水平。因此，数字高程模型(DEM)中低于水位的部分将受到大小为$p=\rho g\Delta h$的压力和大小为$T_z=\rho g\Delta h\mathrm{d}s$的面力，其中$\rho$为水的密度，$g$为重力，$\Delta h$为DEM与水位的差值，d$s$代表单位面积。

3 计算结果

3.1 蓄水对库区位移场的影响

向家坝、溪洛渡、乌东德和白鹤滩水库分别于2012年10月、2013年5月、2020年1月和2021年4月陆续蓄水运行，各水库蓄水半年后水位趋于稳定。图3展示了研究区在梯级水库相继蓄水影响下的累积位移场空间分布特征。数值模拟结果显示，水库蓄水过程中，水体静载荷产生的垂向应力显著改变了区域应力状态，导致河流及其周边地块发生明显的挤压变形。根据蓄水时序，该过程可划分为四个典型阶段：向家坝-溪洛渡联合蓄水期、乌东德单库蓄水期、白鹤滩单库蓄水期，以及水库蓄水完成后的黏性松弛阶段(图4)，以下将分别对各阶段区域形变场特征进行讨论。

向家坝水库位于四川省宜宾县境内，2012年水库蓄水后，流经宜宾县的河流北侧地块向北发生位移，南侧地块向南产生形变。溪洛渡水库于2013年开始蓄水，在此期间向家坝水库仍维持较高水位运行，因此该阶段区域地壳形变受两座水库联合调蓄作用的共同影响。需作一体化讨论。当溪洛渡水库蓄水完成后，受两库静水载荷的叠加效应影响，R1与R2地区均呈现北侧地块持续向北位移，南侧地块则呈现向南的位移趋势(图4A2)。

乌东德水电站于2020年1月开始蓄水，蓄水半年后库区周围虽产生形变，但形变量明显弱于其他水库。图5给出了各水库水位随时间变化的曲线(刁桂苓等，2014；杨磊等，2019；刘恒等，2023；李超瑞等，2025)，乌东德水库自蓄水初期的930 m水位上升至蓄水完成后的975 m水位，水位总计上升约45 m，与向家坝水库的100 m、溪洛渡水库的110 m以及白鹤滩水库的135 m水位增量相比，

表 2　断裂带几何信息

断裂带	走向(°)	倾角(°)	倾向	性质[a)]	参考文献
则木河	330	90	W	LL	徐锡伟等，2003
大凉山	160–180	90	W	LL	徐锡伟等，2003
小江	340	70	E	LL	闻学泽等，2011
普渡河	350	45–80	E	LL+R	余华玉，2023
莲峰	235	60–80	NW	R+RL	闻学泽等，2013
华蓥山	235	60–80	NW	R+RL	闻学泽等，2013
昭通-鲁甸	40	50–70	NW	R+RL	闻学泽等，2013
烟峰	170	60–80	W	R+LL	曾佐勋等，2014

a) LL：左旋走滑；RL：右旋走滑；R：逆冲

乌东德水库的水位增量相对较小，水体载荷对库区底部和周边地壳产生的压力较弱。这一特征导致R4区域地壳形变程度相应较低，数值模拟结果显示，其最大形变量在0.3 cm左右，而其他库区地壳形变量均超过0.6 cm。

白鹤滩水库于2021年启动蓄水，是本研究中四个大型水库中蓄水时间最晚的一座。该水库所在河段金沙江的流向总体呈近南北向。受其蓄水载荷影响，位于库区附近的R3地区表现出显著的东西向形变，而南北向的形变相对较小。此外，由于白鹤滩水库在蓄水期间水位增幅最大，其所引起的静水载荷变化也最为显著，因此R3区域的地壳形变响应在整体上较其他库区更为突出。

综合模拟结果表明，随着金沙江下游梯级水库相继蓄水运行，区域地壳形变表现出明显的叠加效应，累积形变量持续增加。值得注意的是，金沙江下游流域呈现出系统性位移模式：西侧地块以NW向运动为主，而东侧地块则主要表现为SE向运动，这一现象可能与水库蓄水引起的区域构造应力场的调整有关。在四座水库全部完成蓄水后，受地壳介质黏性松弛效应的影响，整个研究区在后续200年间仍持续发生微小形变，但其累计形变量不超过0.04 cm，变化幅度总体较小。其中，白鹤滩库区周边仍是黏性松弛效应影响最为显著的地区。

3.2　蓄水对库区孔隙压力场的影响

各水库蓄水后，库底岩体受水体载荷作用而发生弹性位移，附近断层面上的正应力和剪应力同样受其影响而改变。同时，在水头压力的驱使下，水体沿着渗透性较好的断层向深部扩散，导致断层面上的孔隙压力增加。由于不同断层与各水库的距离不同，它们的孔隙压力响应也存在差异，距离水库越近的断层孔隙压力变化越大。图6绘制了金沙江下游梯级水库蓄水完成后区域内主要断裂带上孔隙压力的变化。则木河断裂带和大凉山断裂带距离白鹤滩水库较近，烟峰断裂带靠近溪洛渡水库，华蓥山断裂带靠近向家坝水库，各断裂带孔隙压力响应明显，与水库距离最近的大凉山断裂带约有20 km断层段的孔隙压力响应高达100 kPa。

小江断裂带和普渡河断裂带靠近白鹤滩和乌东德两大水库，受两个水库的共同影响，断裂带对孔隙压力的响应明显，受孔隙压力影响的断层段长达70 km，普渡河断裂带约有30 km长的断层段孔隙压力变化量超100 kPa。莲峰断裂带北侧临近溪洛渡水库，且断层段西南端已延申至白鹤滩水库，受两个水库蓄水的共同影响，莲峰断裂带共有两处断层段产生孔隙压力响应。白鹤滩水库蓄水后，莲峰断裂带西南段的孔隙压力有一定的升高，增量约20 kPa。但莲峰断裂带的倾向为NW向，因此位于其西北侧的溪洛渡水库蓄水对莲峰断裂带的影响更加显著，约有20 km断层段的孔隙压力增量超过60 kPa。昭通-鲁甸断裂带虽靠近溪洛渡和白鹤滩水库，但距离较远，孔隙压力变化明显弱于其他断裂带，最大值仅在3 kPa左右。

为准确评估单库蓄水对特定断层孔隙压力响应，本文选取小江断裂带与莲峰断裂带作为研究对象，分别计算了向家坝、溪洛渡、乌东德和白鹤滩四个水库在蓄水半年后对两条断裂带孔隙压力变化的影响(图7)。结果表明，小江断裂带由于紧邻白鹤滩水库，在该水库完成蓄水后表现出显著的孔隙压力响应。其中约20 km的断层段孔隙压力增量达到15 kPa，最大增量甚至超过20 kPa。相比之下，溪洛渡与乌东德水库单库蓄水后，小江断裂带虽也出现一定响应，但因空间距离较远，受影响断层段较短，孔隙压力变化幅度较小，最大增量均未超过1 kPa。莲峰断裂带北段邻近溪洛渡水库，南段紧靠白鹤滩水库。在这两座水库完成蓄水后，莲峰断裂带均表现出显著的孔隙压力响应，孔隙压力增量均超过30 kPa。其中，北段受溪洛渡水库蓄水影响尤为明显，孔隙压力最大增量达到50 kPa。相比之下，莲峰断裂带距离向家坝水库较远，受其蓄水影响较弱，仅在断裂带北段观测到约0.4 kPa的

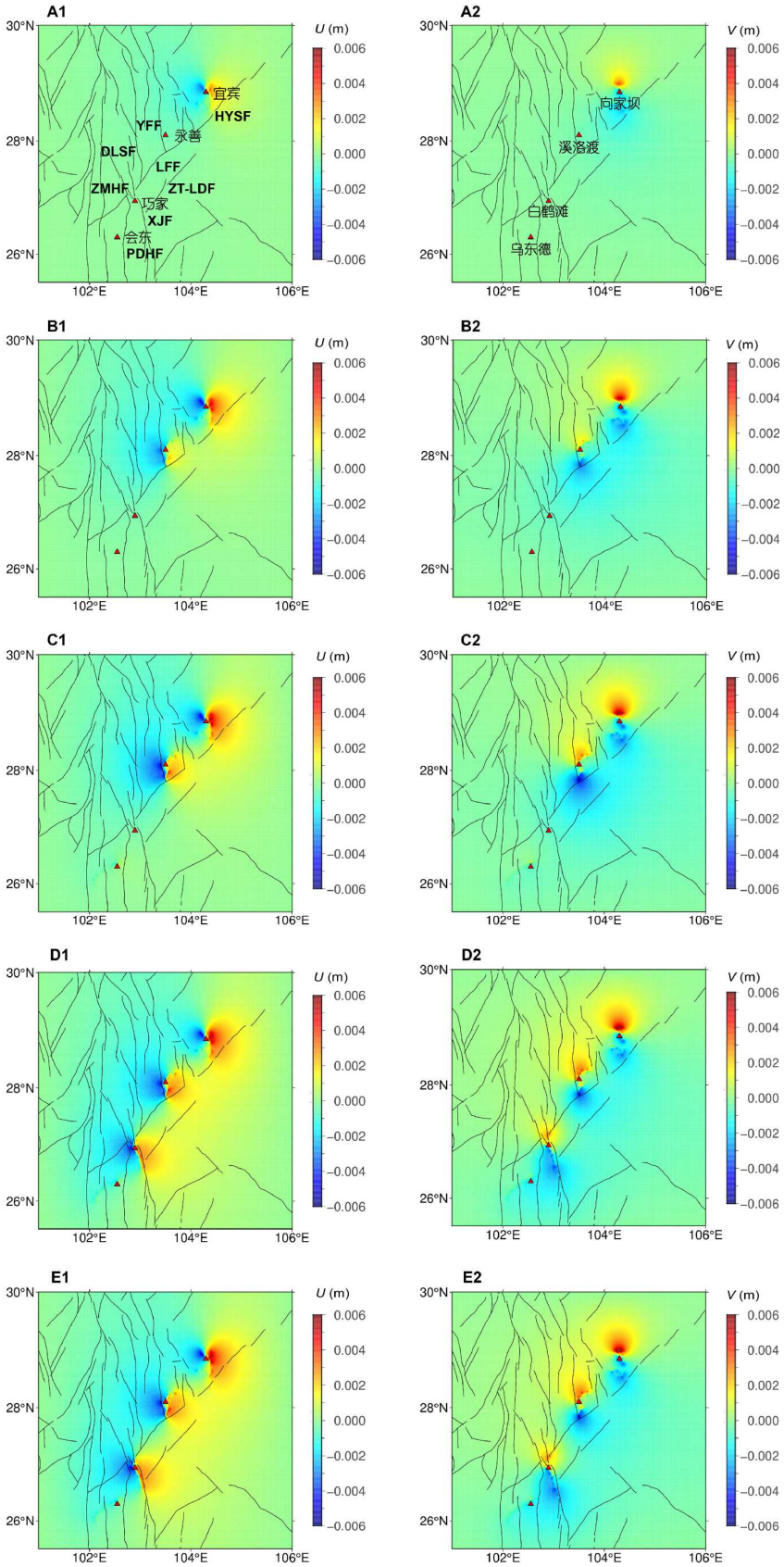


图 3　各水库蓄水后库区位移场变化图。(A1–E1)为东西向位移U(取东向为正)，(A2–E2)为南北向位移V(取北向为正)。(A1，A2)、(B1，B2)、(C1，C2)和(D1，D2)分别为向家坝、溪洛渡、乌东德和白鹤滩水库蓄水半年后研究区域的累积位移场，(E1，E2)为计算终止时的累积位移场

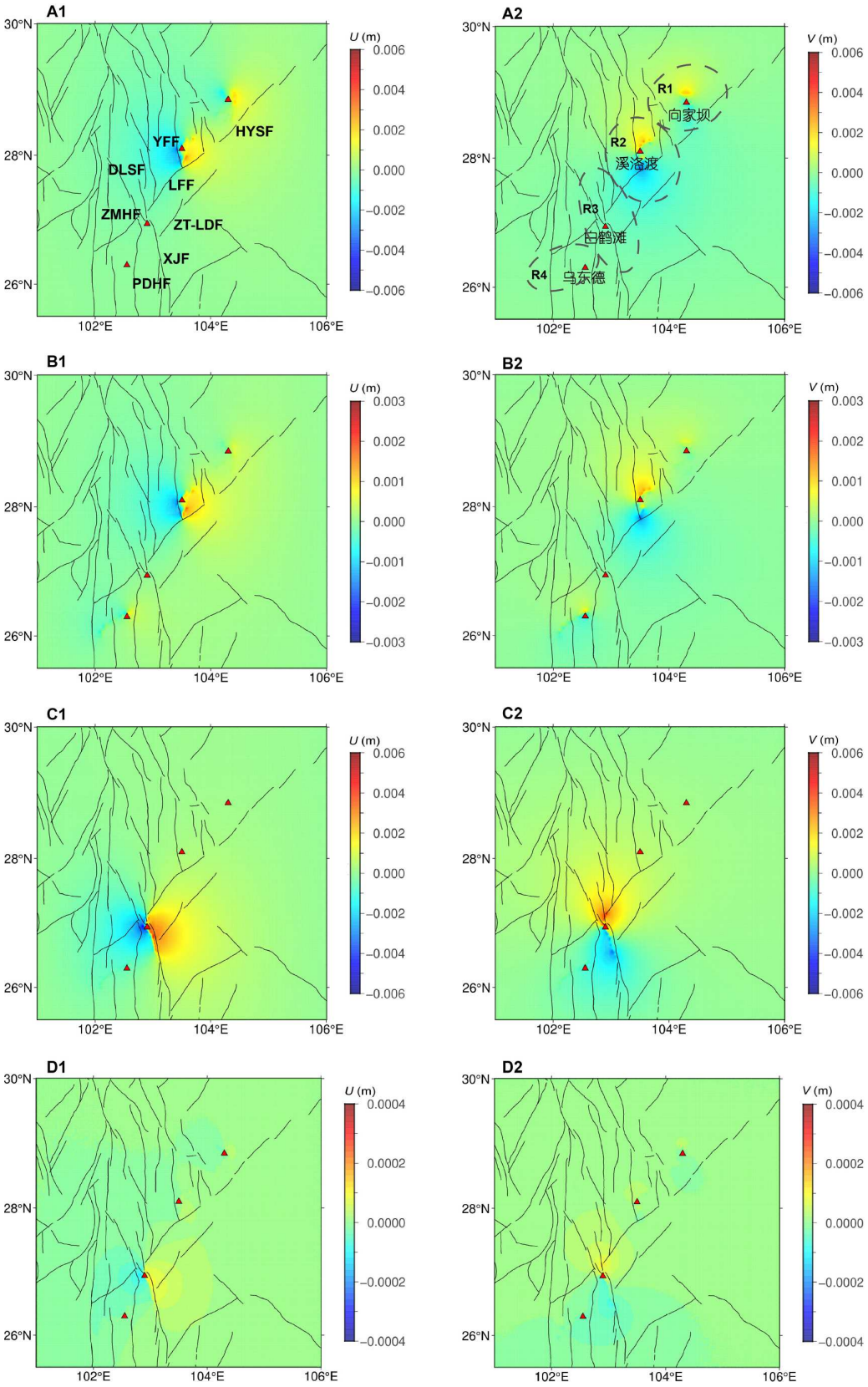


图 4　单库蓄水与黏性效应对库区形变场的影响。(A1–D1)为东西向位移U(取东向为正)，(A2–D2)为南北向位移V(取北向为正)。(A1，A2)、(B1，B2)和(C1，C2)分别为向家坝-溪洛渡、乌东德和白鹤滩水库蓄水半年后研究区域的位移场，(D1，D2)为长期黏性松弛效应对位移场的影响。R1–R4分别为向家坝、溪洛渡、白鹤滩和乌东德水库的影响子区域

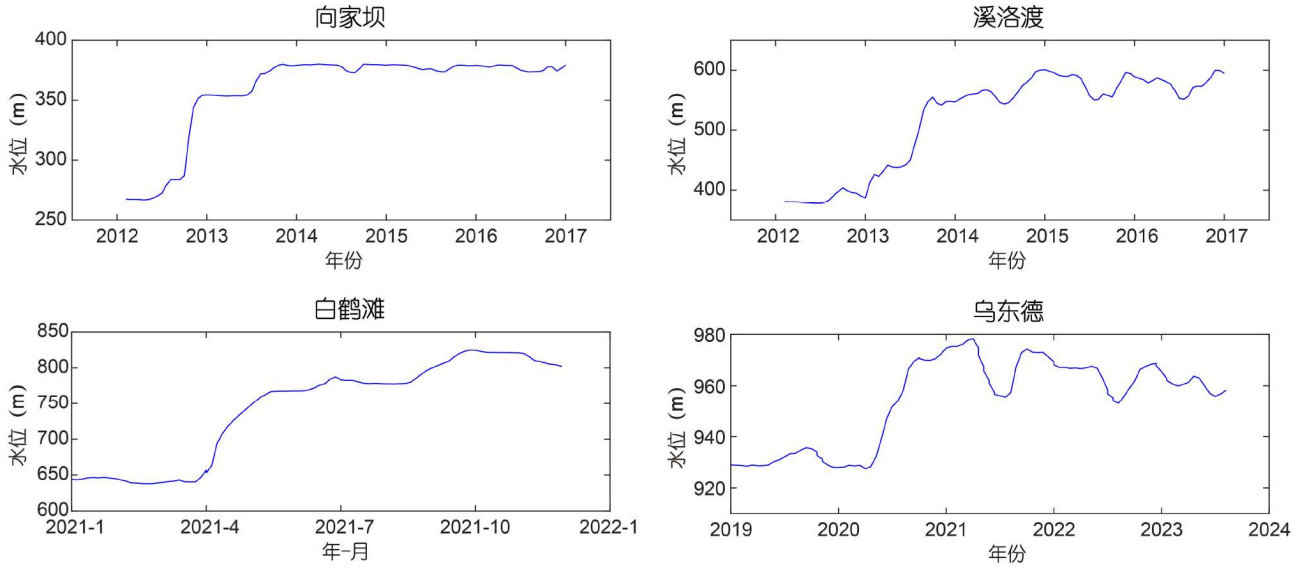


图5　金沙江下游梯级水库水位-时间变化图

孔隙压力变化。

在四座水库全部完成蓄水后，由于介质黏性松弛效应的持续作用，断裂带在后续时段内仍存在孔隙压力响应，但增量总体较小。模拟结果显示，直至2224年底，小江断裂带与莲峰断裂带的孔隙压力增量均仅为数百帕量级。

4　讨论

4.1　库区地震活动空间变化

金沙江下游梯级库区地震的最佳震源深度集中在5–15 km范围内，表明区域内主要孕震层位于此深度区间，该深度范围对应于易发生断裂的中上地壳脆性域(Zhang等，2002；段梦乔和赵翠萍，2019)。基于此认识，本研究重点分析了10 km深度处孔隙压力随水库蓄水过程的时空演化特征(图8)，以揭示水库蓄水对区域地震活动性的影响机制。各水库蓄水后10 km深度处的孔隙压力呈现显著变化，最大变化幅度达60 kPa。值得注意的是，在梯级水库相继蓄水过程中，下游水库区表现出明显的叠加效应：孔隙压力变化幅度进一步增强，最大增量约180 kPa，影响范围显著扩大，可达库区外围约30 km。这一现象揭示了梯级水库蓄水对区域孔隙压力场的累积影响。

水库蓄水作用显著影响了库区地震活动性特征，主要表现为蓄水后地震频次普遍增加，其中溪洛渡和白鹤滩两库区的地震活动增强现象尤为显著(图8)。白鹤滩水库蓄水后，R3区域地震活动性呈现显著增强趋势，地震频次增加，震级增大，其中小江断裂带的地震活动尤为显著。基于孔隙压力分布结果显示(图6)，水库蓄水导致小江断裂带孔隙压力增量超过20 kPa，且该增量影响范围沿断裂带延伸达20 km。根据Grigoli等(2017)提出的诱发地震机制，小江断裂带上增大的孔隙压力可能削弱了断层面上的正应力，使得断层面上的剪应力超过其静态摩擦力，从而导致断层失稳并诱发地震活动。

乌东德水库蓄水半年后，R4区域地震活动呈现微弱增强，但未达到显著水平。结合前文分析，乌东德水库蓄水期间水位变化幅度较小，导致水体载荷对库底及周边地壳的应力扰动有限。因此，该区域地震活动的轻微增强可能与其孔隙压力增量较低有关。相比之下，向家坝水库蓄水半年后，R1区域的地震活动性未表现出显著变化。这一现象可能与库区范围内缺乏明显的活动断裂分布有关，历史地震记录亦表明该区域构造地震活动性较低。

4.2　地震震级频度关系

本文中库区地震活动性的分析主要以地震目录为基础，评估地震目录的完整性震级则是此项内容的前提。最大曲率法(MAXC)是确定地震完备震级(M_c)的一种最快速、最直接的方法(Wyss等，1999；Wiemer和Wyss，2000)。绘制累积震级-频度(G-R)分布曲线(图9)，曲线一阶导数的最大值即M_c(Woessner和Wiemer，2005；史翔宇，2020)。b值作为G-R关系中的重要参数，分析各库区蓄水前后b值变化可评估水库蓄水对区域地震活动性的影响。由于地震数据通常是离散的，所以本文采用Utsu

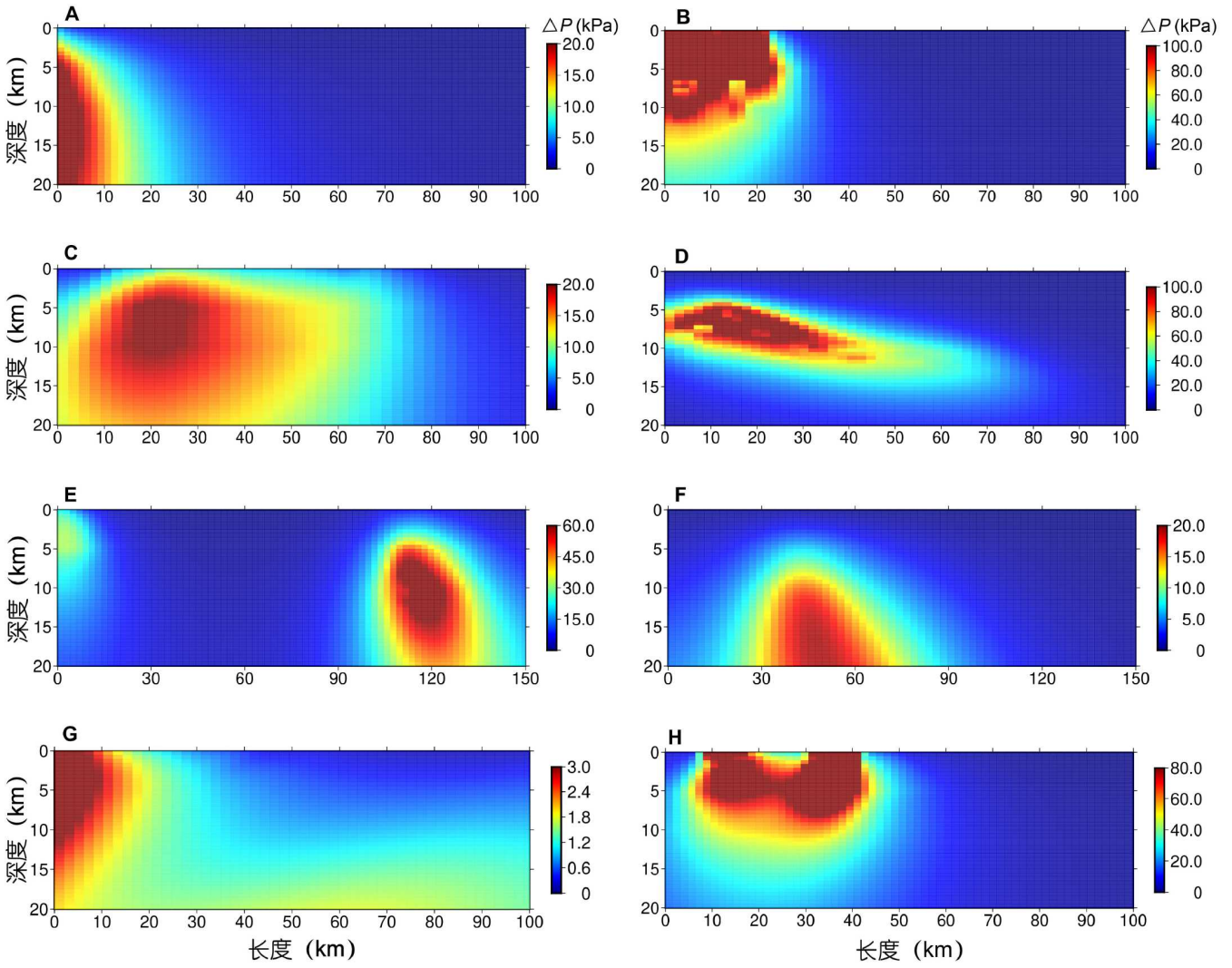


图 6　金沙江下游梯级水库蓄水后研究区主要断裂带孔隙压力变化图。各断裂带以近水库端为起点，沿断层走向延展为二维平面。(A–H)分别为则木河断裂带、大凉山断裂带、小江断裂带、普渡河断裂带、莲峰断裂带、华蓥山断裂带、昭通-鲁甸断裂带和烟峰断裂带

(1966)提出的式(5)计算b值：

$$b = \frac{1}{\ln(10)\left(\overline{M} - (M_c - \Delta M/2)\right)} \tag{5}$$

其中，$\overline{M}$是平均震级，$\Delta M = 0.1$为最小震级间隔，M_c为最小完备震级。依据最大曲率法，向家坝、溪洛渡、白鹤滩和乌东德各水库的M_c依次为0.0、0.6、0.5和1.0。

溪洛渡、白鹤滩和乌东德水库蓄水前，库区背景地震的b值分别为0.6379、0.6207和0.7676。结合图9B–9D区域背景地震的散点分布图可知，水库蓄水前，库区主要以$M \leqslant 2.0$地震活动为主，且频次相对较低。蓄水后，各库区b值上升至0.7035、0.8575和0.8329，地震频次整体呈增加趋势，尤以中小地震($M \leqslant 2.0$)频次增加为主。通过对蓄水前后地震活动的对比分析，发现各水库蓄水后b值均有所增加，库区小震数量增多。这可能是与水库蓄水导致库区应力场调整有关，或库水渗透导致断层孔隙压力升高、有效应力降低，进而诱发断层滑动，断层上的累积应力得到释放。前人研究结果同样表明，水库蓄水后b值的增加与区域应力水平变化触发大量小震活动之间存在关联(Babar，2014；姜金钟等，2016)。

如图9A所示，向家坝库区的b值由蓄水前的1.3258下降至蓄水后的0.9491，蓄水后库区小震比例减少，而较大地震相对增多，尤以$M \geqslant 1.0$地震为主。向家坝水库位于四川省宜宾市与云南省昭通市交界处，靠近长宁页岩气区块，因此该区域地震活动变化可能同时受到水库蓄水和页岩气开采活动的共同影响。值得注意的是，页岩气开采会诱发一系列小震，导致该区域小震比例升高；而蓄水后尽管地震总数减少，但主要表现为小震级地震数

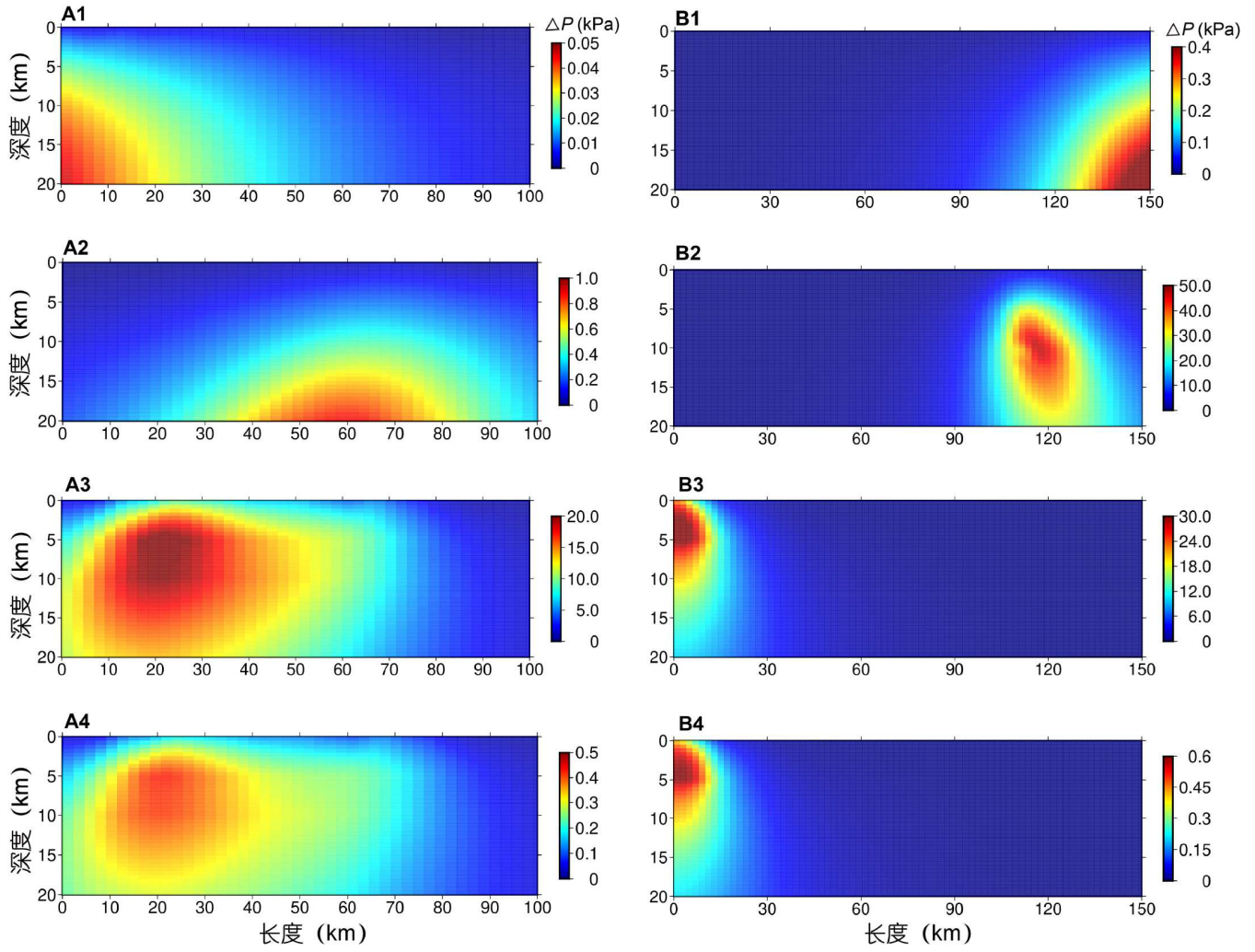


图7　单库蓄水对小江断裂带与莲峰断裂带孔隙压力的影响。(A1–A4)分别表示溪洛渡、乌东德、白鹤滩单库蓄水以及长期黏性效应对小江断裂带孔隙压力的影响；(B1–B4)分别表示向家坝、溪洛渡、白鹤滩单库蓄水以及长期黏性效应对莲峰断裂带孔隙压力的影响

量下降，这可能与页岩气开采趋于稳定有关；与此同时，较大地震数量在蓄水后明显增加，则应主要归因于水库蓄水的影响。因此，仅基于蓄水时间段进行分析，难以完全刻画该区地震活动的复杂性。在未来的研究中，需要进一步结合区域地质构造、开采活动时序数据及水文地质模型，开展多因素耦合的定量分析。

4.3　库仑应力变化分析

本文基于库仑应力变化理论，对梯级水库蓄水后区域内主要断层的库仑应力变化特征及其地震危险性进行了定量分析，系统计算了末级水库蓄水完成后研究区主要断裂带的库仑应力变化量(式(6))及其空间分布特征(图10)。当库仑应力增大时，即$\Delta CFS>0$，表明应力条件有利于断层面滑动，地震发生的可能性增加，而当库仑应力减小时，即$\Delta CFS<0$，表明当前应力条件不利于断层滑动，地震发生的可能性减弱(Stein和Lisowski，1983；Harris，1998；石耀霖，2001)。

$$\Delta CFS=\Delta\tau+\mu(\Delta\sigma_n+\Delta p) \tag{6}$$

式中，μ是断层摩擦系数，$\Delta\sigma_n$和$\Delta\tau$分别为沿滑动面的正应力变化与剪应力变化量，Δp为孔隙压力变化。一般情况下，断层摩擦系数变化范围为0.2–0.8，累积滑动量较小的断层，其摩擦系数较高(Parsons等，1999)。为简化计算，同时突出水库位置对各个断层地震活动性的影响，本次各断裂带摩擦系数设置为统一值，由于金沙江下游库区断层均较为活跃，因此设置$\mu=0.6$。

白鹤滩水库位于川滇块体东缘的大凉山次级块体南部，地处青藏高原向东南挤压的前缘构造带，区域构造活动复杂，新构造运动显著。库区周边主要发育则木河断裂带、大凉山断裂带、小江断裂带和莲峰断裂带等数

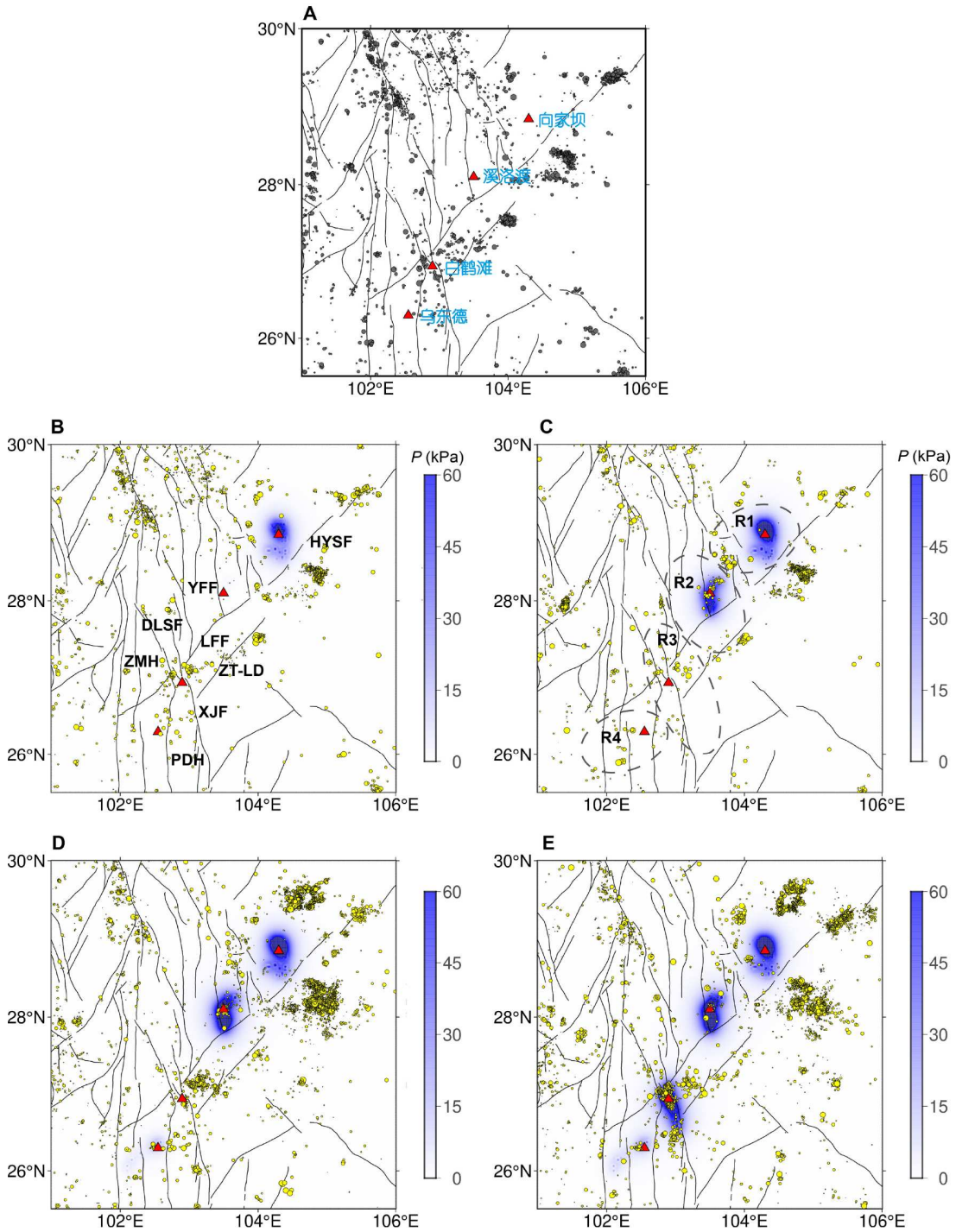


图 8　金沙江下游梯级水库蓄水后研究区孔隙压力与地震分布图。灰色圆点与黄色圆点代表地震分布，红色三角为梯级水库位置，黑色实线为断层分布。(A)为区域内首个水库蓄水前一年的背景地震分布，(B–E)分别为向家坝、溪洛渡、乌东德和白鹤滩蓄水后半年内地震分布。(A–E)中均为3级及以下地震分布(数据来自国家地震科学数据中心, https://data.earthquake.cn/)。R1–R4分别为向家坝、溪洛渡、白鹤滩和乌东德水库的影响子区域

条高活动性断裂，这些断裂带在晚第四纪以来均表现出不同程度的构造变形，并具有中强地震孕育背景(徐锡伟等，2003；闻学泽等，2013)。白鹤滩水库蓄水后，由于库水渗透及静水压力作用，区域应力场调整显著。上述四条断裂带在近库区约20 km的断层段上均表现出明显的应力加载效应，其库仑应力增量普遍超过10 kPa，这一数值已达到普遍认同的10 kPa地震触发阈值(King等，1994；Harris和Simpson，1998)。值得注意的是，大凉山断裂带的库仑应力最大增量已超过80 kPa，远高于触发阈值，表明该断裂带受水库蓄水影响最为显著，地震失稳风险较

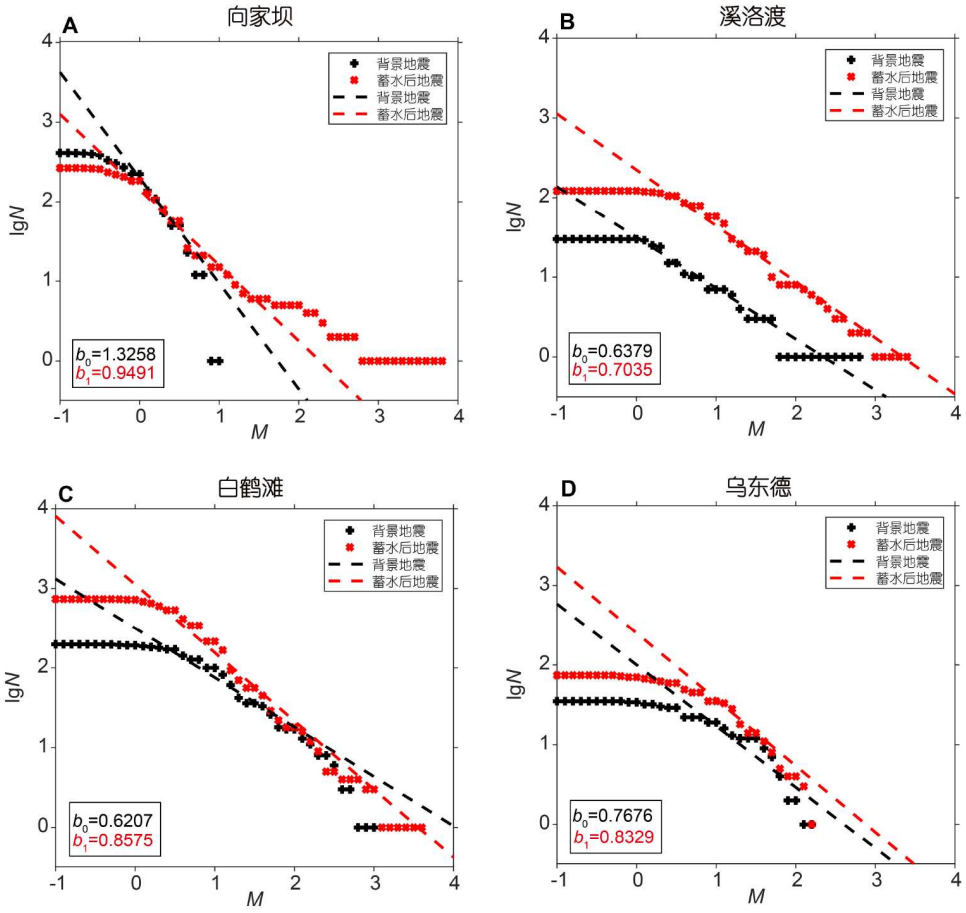


图9 金沙江下游梯级库区蓄水前后地震震级-频度关系对比。*M*表示地震震级，*N*表示对应震级的地震频次。采用各库区(1°×1°)蓄水前后半年内的地震数据绘制，*b*值为G-R关系拟合结果，其中b_0表示蓄水前*b*值，b_1表示蓄水后的*b*值

高。地震记录显示，在库仑应力增量较高的区域，中小地震活动频次明显增加。这一应力加载过程与近年来库区地震活动的增强具有显著相关性(刘恒等，2023)。

溪洛渡库区紧邻莲峰断裂带与烟峰断裂带的构造交汇部位，区域地质构造格局复杂。邻近断裂带的力学状态受蓄水影响变化明显，其中，烟峰断裂带库仑应力变化最为显著。计算结果显示，该断裂带最大库仑应力增量已达120 kPa，且在约30 km的断层段上应力增量超过60 kPa。地震记录也显示，该断层段的地震分布集中，中小地震活动增加。靠近溪洛渡水库的莲峰断裂带东北段虽受蓄水影响，库仑应力增加，但总体增量在10 kPa以内，未达到显著触发地震的应力阈值，因此该段没有明显地震活跃现象发生。

从断层活动性来看，小江断裂带在向家坝与溪洛渡水库联合蓄水期间，地震频次尚未发生显著变化(图8)。自乌东德水库开始蓄水后，小江断裂带周边区域的地震活动性逐渐增强，这一趋势在白鹤滩水库完成蓄水后更为明显。具体表现为R3区域内地震事件数量显著增加，且地震空间分布主要集中在小江断裂带周边。在向家坝、溪洛渡和乌东德水库蓄水期间，大凉山断裂带周边地震活动未发生显著变化；然而，白鹤滩水库蓄水后，该断裂带地震活动明显增强。溪洛渡水库蓄水后，烟峰断裂带周边地震活动显著增加，但在后续乌东德与白鹤滩水库蓄水过程中，该断裂带的地震活动性逐渐减弱。结合图10分析表明，库仑应力的变化可能对这些断层的活动性产生了直接影响。

华蓥山断裂带邻近向家坝库区，但在该水库完成蓄水后，尽管断裂带出现了近8 kPa的库仑应力增量，其周边区域的地震活动频次与强度均未出现统计学意义上的显著增强。结合前人研究成果，华蓥山断裂带在地质构造上并不属于活动断裂，年代学研究也表明该断裂带在晚第四纪以来不具备活动性(周荣军等，1997；闻学泽等，2013)。因此，尽管受水库蓄水引起的水体载荷作用，华蓥山断裂带表现出显著的孔隙压力响应与库仑应力变化，却未引发明显的断层活动性增强。

此外，乌东德水库蓄水期间水位变化幅度较小，最

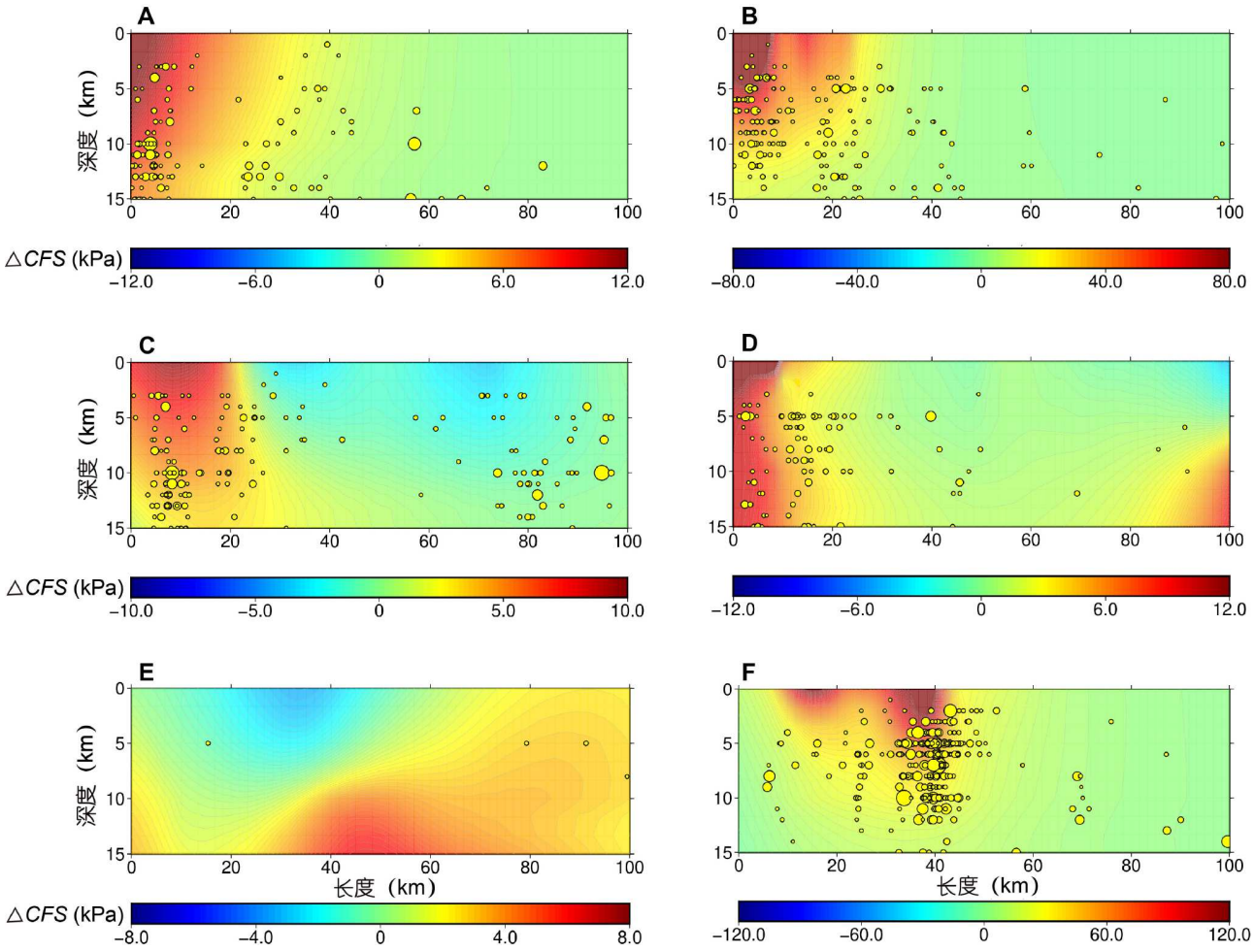


图 10　金沙江下游梯级水库蓄水后库区主要断裂带库仑应力变化与地震分布图。各断裂带以近水库端为起点，沿断层走向延展为二维平面。(A–F)分别为则木河断裂带、大凉山断裂带、小江断裂带、莲峰断裂带、华蓥山断裂带和烟峰断裂带。黄色圆点为梯级水库开始蓄水至白鹤滩水库蓄水半年后(即2012年10月1日至2021年10月1日)各断层附近10 km以内的地震活动分布，圆点大小表示地震震级大小

大变幅约45 m，水体载荷对库区地壳应力场扰动有限。基于这一实际情况，本研究暂未对乌东德水库周边断裂带进行系统的库仑应力变化分析。根据前文分析可知，乌东德库区在蓄水期间地震活动性保持相对稳定，并未出现明显的诱发地震现象。

受金沙江下游梯级水库蓄水影响，则木河断裂带、大凉山断裂带、小江断裂带、莲峰断裂带和烟峰断裂带的库仑应力增幅较大，增量均超10 kPa的应力触发阈值，地震发生的可能性增加。但对于距离水库较远的断裂带(如华蓥山断裂带)以及水位变化较小的水库(如乌东德水库)，其诱发地震的风险相对较低。然而，考虑到地质条件的复杂性和长期效应的可能性，建议对这些区域继续进行长期的地震活动监测和应力场演化模拟，进一步评估水库诱发地震的潜在影响范围，为库区地震灾害防控提供科学依据。

4.4　水库蓄水对不同类型地震的影响

金沙江下游地区位于青藏高原东南缘构造转换带的核心区域，是印度板块与欧亚板块陆-陆碰撞造山过程中形成的典型陆内变形带。该区域处于川滇菱形块体东边界与扬子地块西缘的构造交汇部位，发育了以鲜水河-安宁河-则木河-小江断裂带为代表的巨型左旋走滑断裂系统。新生代以来，受印度板块向北俯冲挤压，青藏高原物质沿大型走滑断裂带发生东南方向的挤出逃逸。在四川盆地的刚性阻挡作用下，形成了显著的构造应力集中区，并发育了以莲峰断裂带、昭通-鲁甸断裂带为代表的北东向逆冲推覆构造体系(Zhang等，2004；许志琴等，2011；张伟恒等，2018；王岸等，2023)。根据郭祥云等(2024)基于CAP波形反演方法获得的川滇菱形块体及邻区震源机制解统计分析结果可知，金沙江下游流域地震活动类型主要以走滑型和逆冲型为主，这一现象与区域

构造背景及断裂带活动特征密切相关。

基于上述分析，为深入探究水库蓄水载荷对区域内不同类型地震活动性的影响，本研究基于库仑应力变化理论，系统计算了水库蓄水引起的走滑型与逆冲型两种震源机制对应的库仑应力变化场，分析了2012–2017年水库蓄水导致的地下10 km深度处的区域应力场变化对不同类型地震的影响，定量评估了水库蓄水对两类构造地震的应力触发效应(图11)。

在水库蓄水工程实施前，研究区$M_L \geqslant 4.0$的中强震活动频次维持在较低水平，年均6次左右。随着向家坝和溪洛渡水库相继完成蓄水，库区周边地震活动性呈现显著增强，地震频次增加约2倍，这一现象在白鹤滩水库东北侧与向家坝水库西南侧交界区域(区域Ⅰ)尤为突出。值得注意的是，尽管白鹤滩水库此时尚未蓄水，但计算结果显示，其构造应力场(区域Ⅰ南端)已受到相邻水库蓄水的显著调制。基于库仑应力变化的定量分析，区域Ⅰ整体位于库仑应力增强区($\Delta CFS > 0$)，局部最大值超40 kPa，显著超过10 kPa的应力触发阈值，走滑型与逆冲型断层均呈现应力积累特征，这一力学机制与观测到的地震类型分布变化具有良好的一致性。研究结果表明，水库蓄水过程对走滑型和逆冲型地震活动具有明显的触发效应。鉴于金沙江梯级水库群的长期运营需求，建议重点关注库区周边走滑型与逆冲型地震活动频发可能引发的链生灾害效应。本研究结果可为区域地震危险性评估及防灾减灾策略制定提供科学依据。

5 结论

本研究基于三维孔隙-黏弹性有限元模型，对金沙江下游梯级水库群进行数值模拟，系统研究了水库群相互作用下的库区形变场演化规律与应力场调整特征，并探讨了水库蓄水对区域地震活动的触发机制。研究成果可为水库诱发地震风险评估与防震减灾工作提供科学依据。主要研究结论如下：

(1)受水体静载荷与孔隙流体压力的耦合作用影响，金沙江下游梯级水库蓄水导致库区及邻近区域产生显著的地表形变，主要表现为西侧地块NW向和东侧地块SE向的系统性位移。受地壳介质黏性松弛效应的影响，在长时间尺度上，研究区仍持续发生微小形变，但其量级较小，累计形变量不超过0.04 cm。

(2)金沙江下游梯级水库蓄水引起周围断裂带上孔隙压力发生改变。整体上，库区孔隙压力增量与断裂带-水库的空间配置关系呈现明显的距离依赖性，其中距离库区较近的断裂带表现出更显著的孔隙压力响应，局部孔隙压力增量达100 kPa。梯级水库蓄水过程对区域孔隙压力场产生显著的累积效应，数值模拟结果显示，在库区下方10 km深度范围内，孔隙压力最大增量约180 kPa，其影响范围径向延伸至库区外围约30 km区域。

(3)水库蓄水显著影响了库区周边断裂带的应力状态，其中则木河断裂带、大凉山断裂带、小江断裂带、莲峰断裂带和烟峰断裂带的库仑应力增量均超过10 kPa的地震触发阈值，表明这些断裂带发生地震的可能性有所增加。在库仑应力增大的断层附近，地震频率增加，表明由蓄水引起的断层库仑应力增大与地震活动增加有明显关系。值得注意的是，大凉山断裂带的库仑应力最大增量超过80 kPa，显著高于触发阈值，地震失稳风险较高。

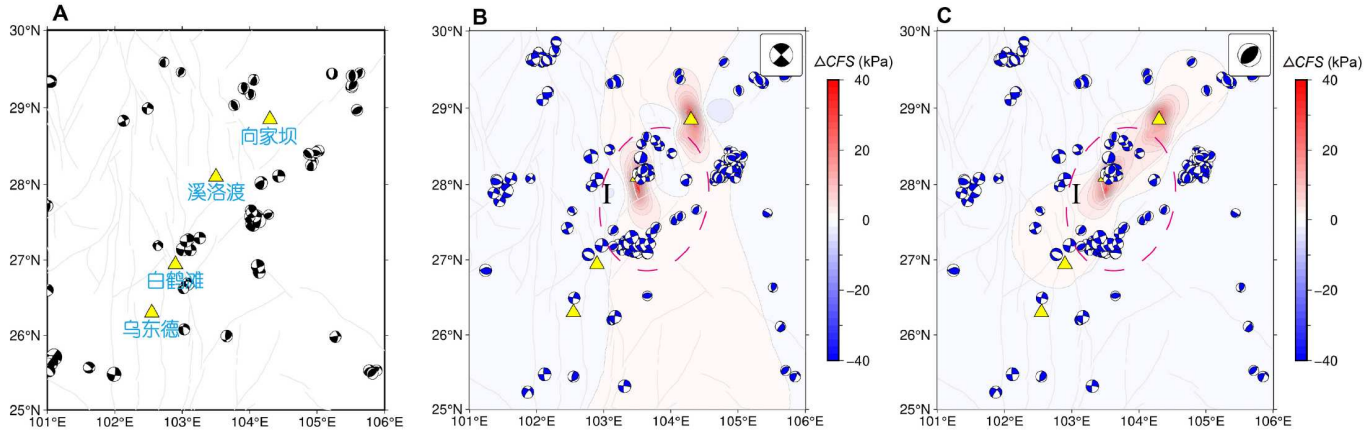


图 11 水库蓄水对区域不同类型地震活动性的影响。灰色实线为研究区主要断层分布，黄色三角为梯级水库位置，背景颜色为水库蓄水导致的库仑应力变化($\Delta CFS > 0$)。黑色沙滩球为2009年1月至2012年9月发生的$M_L \geqslant 4.0$地震的震源机制解，即水库蓄水前的地震活动。蓝色沙滩球为2012年10月至2017年12月发生的$M_L \geqslant 4.0$地震的震源机制解，即水库蓄水后的地震活动(数据来自中国地震科学实验场的科技产品，cses.ac.cn/sjcp/ggmx/2021/130.shtml/)

(4)梯级水库蓄水作用显著改变了库区地震活动性特征，表现为地震频次增加明显。特别是对走滑型和逆冲型断层的地震活动表现出明显的触发效应($\Delta CFS > 10$kPa)，其中溪洛渡和白鹤滩库区的地震活动性变化最为显著。这一现象可能与水库荷载引起的库仑应力变化及孔隙压力扩散作用密切相关。

本研究主要探讨水库蓄水引起的水体载荷对库区应力场及周边断裂带地震活动性的影响。为明确水库蓄水的独立效应，本研究暂未考虑构造应力加载和邻近区域大地震等干扰因素。后续研究将进一步完善模型设置，纳入更复杂的边界条件，以深入分析库区应力场演化特征及断裂带活动性响应机制。

参考文献

曹忠权, 汪一鹏, 殷秀华, 等. 1993. 马边地震带发震构造背景的初步研究. 中国地震, 9: 373–383

曾佐勋, 刘根深, 李献瑞, 等. 2014. 鲁甸地震地壳流变结构. 地球科学(中国地质大学学报), 39: 1751–1762

常廷改, 胡晓. 2018. 水库诱发地震研究进展. 水利学报, 49: 1109–1122

程惠红, 张怀, 朱伯靖, 等. 2012. 新丰江水库地震孔隙弹性耦合有限元模拟. 中国科学: 地球科学, 42: 905–916

邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 2002. 中国活动构造基本特征. 中国科学D辑: 地球科学, 32: 1020–1030

邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 2003. 中国活动构造与地震活动. 地学前缘, 10: 66–73

刁桂苓, 王曰风, 冯向东, 等. 2014. 溪洛渡库首区蓄水后震源机制分析. 地震地质, 36: 644–657

段梦乔, 赵翠萍. 2019. 金沙江下游水库区地震震源机制特征. 地震地质, 41: 1155–1171

高金尉. 2012. 四川盆地西南地区构造几何学与运动学特征及其对青藏高原东南缘动力学背景的指示. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京)

郭伟, 赵翠萍, 左可桢, 等. 2022. 金沙江下游白鹤滩水库蓄水前后地震活动特征. 地球物理学报, 65: 4659–4671

郭祥云, 房立华, 韩立波, 等. 2024. 川滇菱形块体东边界震源机制与应力场特征. 地震地质, 46: 371–396

黄圣睦. 2003. 安宁河-则木河-小江地震带强震危险性趋势讨论. 四川地震, 2: 17–20

姜金钟, 付虹, 陈棋福. 2016. 位于构造活跃区的小湾水库地震活动特征——基于地震精定位的分析. 地球物理学报, 59: 2468–2485

李碧雄, 田明武, 莫思特. 2014. 水库诱发地震研究进展与思考. 地震工程学报, 2014, 36: 380–386

李超瑞, 汤明高, 周剑, 等. 2025. 乌东德水电站库区滑坡发育分布及蓄水响应规律. 水利水电技术(中英文), 56: 35–51

刘恒, 付真, 吴建平, 等. 2023. 白鹤滩水库蓄水前后邻区地震活动与应力场变化特征. 地球物理学报, 66: 4189–4205

刘影, 于子叶, 张智奇, 等. 2023. 基于密集流动台阵构建的川滇地区高分辨率公共速度模型2.0版本. 中国科学: 地球科学, 53: 2407–2424

石耀霖. 2001. 关于应力触发和应力影概念在地震预报中应用的一些思考. 地震, 21: 1–7

史翔宇, 王晓青, 邱玉荣, 等. 2020. 川滇地震科学实验场地震目录最小完整性震级分析. 地球物理学报, 63: 3683–3697

汪东川, 俞长锦, 孙苗苗, 等. 2024. 金沙江干热河谷典型水电开发对局地气候的影响. 水土保持学报, 38: 158–166

王岸, 王国灿, 王团乐, 等. 2023. 青藏高原东南缘金沙江下游新生代构造与地貌演化. 地质力学学报, 29: 453–464

闻学泽, 杜方, 龙锋, 等. 2011. 小江和曲江-石屏两断裂系统的构造动力学与强震序列的关联性. 中国科学: 地球科学, 41: 713–724

闻学泽, 杜方, 易桂喜, 等. 2013. 川滇交界东段昭通、莲峰断裂带的地震危险背景. 地球物理学报, 56: 3361–3372

徐建荣, 王兴旺, 王建新, 等. 2022. 白鹤滩拱坝初期蓄水库岸变形机理研究. 水力发电学报, 41: 31–41

徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源. 中国科学D辑: 地球科学, 33(S1): 151–162

许志琴, 李海兵, 唐哲民, 等. 2011. 大型走滑断裂对青藏高原地体构架的改造. 岩石学报, 27: 3157–3170

杨磊, 李保华, 常廷改. 2019. 向家坝水电站蓄水前后库区地震活动特征. 大地测量与地球动力学, 39: 919–923

尹光耀, 张怀, 石耀霖. 2023. 梯级水坝的地震触发级联效应: 以溪洛渡和向家坝水库为例. 地球物理学报, 66: 2470–2488

余华玉. 2023. 滇中普渡河断裂相对构造活动性研究. 硕士学位论文. 昆明: 昆明理工大学

张国民, 马宏生, 王辉, 等. 2005. 中国大陆活动地块边界带与强震活动. 地球物理学报, 48: 602–610

张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 2013. 中国大陆的活动断裂, 地震灾害及其动力过程. 中国科学: 地球科学, 43: 1607–1620

张天宇, 刘自凤. 2021. 白鹤滩水库诱发地震活动性特征浅析. 地震地磁观测与研究, 42(S1): 145–147

张伟恒, 李文巧, 田勤俭, 等. 2018. 基于牛栏江宽谷面的变形讨论莲峰、昭通断裂带第四纪活动特征. 地震, 38: 22–36

周乐群, 徐公权, 韩凤翔, 等. 2025. 金沙江下游水电开发集中区生产建设项目水土保持“天地一体化”监管探索. 中国水土保持, 5: 79–83

周荣军, 唐荣昌, 钱洪, 等. 1997. 地震构造类比法的应用——以川东地区华蓥山断裂带为例. 地震研究, 20: 316–322

朱家正, 孙玉军. 2022. 四川大岗山水库蓄水对地震活动影响的数值模拟研究. 地球物理学报, 65: 3930–3943

Babar A. 2014. Preliminary study of reservoir triggered seismicity in the vicinity of Tarbela Dam. Pak J Meteorol, 11: 11–29

Chen L, Talwani P. 1998. Reservoir-induced seismicity in China. Pure Appl Geophys, 153: 133–149

Chen Z H, Burchfiel B C, Liu Y, et al. 2000. Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. J Geophys Res, 105: 16215–16227

Ge S M, Liu M, Lu N, et al. 2009. Did the Zipingpu Reservoir trigger the 2008 Wenchuan earthquake? Geophys Res Lett, 36: L20315

Grigoli F, Cesca S, Priolo E, et al. 2017. Current challenges in monitoring, discrimination, and management of induced seismicity related to underground industrial activities: A European perspective. Rev Geophys, 55: 310–340

Gupta H, Purnachandra Rao N, Roy S, et al. 2015. Investigations related to scientific deep drilling to study reservoir-triggered earthquakes at Koyna, India. Int J Earth Sci (Geol Rundsch), 104: 1511–1522

Harris R A, Simpson R W. 1998. Suppression of large earthquakes by stress shadows: A comparison of Coulomb and rate-and-state failure. J Geophys Res, 103: 24439–24451

Harris R A. 1998. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. J Geophys Res, 103: 24347–24358

Huang J L, Zhao D P, Zheng S H. 2002. Lithospheric structure and its relationship to seismic and volcanic activity in southwest China. J Geophys Res, 107: B102255

Hui G, Chen S, Chen Z, et al. 2021. Investigation on two M_w3.6 and M_w4.1 earthquakes triggered by poroelastic effects of hydraulic fracturing operations near Crooked Lake, Alberta. JGR Solid Earth, 126: e2020JB020308

King G C P, Stein R S, Lin J. 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes. Bull Seismol Soc Am, 84: 935–953

Klose C D. 2012. Evidence for anthropogenic surface loading as trigger mechanism of the 2008 Wenchuan earthquake. Environ Earth Sci, 66: 1439–1447
Lee W H K, Raleigh C B. 1969. Fault-plane solution of the Koyna (India) earthquake. Nature, 223: 172–173
Lei X. 2011. Possible roles of the Zipingpu Reservoir in triggering the 2008 Wenchuan earthquake. J Asian Earth Sci, 40: 844–854
Liu Q Y, van der Hilst R D, Li Y, et al. 2014. Eastward expansion of the Tibetan Plateau by crustal flow and strain partitioning across faults. Nat Geosci, 7: 361–365
Molnar P, Tapponnier P. 1978. Active tectonics of Tibet. J Geophys Res, 83: 5361–5375
Parsons T, Stein R S, Simpson R W, et al. 1999. Stress sensitivity of fault seismicity: A comparison between limited-offset oblique and major strike-slip faults. J Geophys Res, 104: 20183–20202
Rice J R, Cleary M P. 1976. Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents. Rev Geophys, 14: 227–241
Royden L H, Burchfiel B C, van der Hilst R D. 2008. The geological evolution of the Tibetan Plateau. Science, 321: 1054–1058
Stein R, Lisowski M. 1983. The 1979 Homestead Valley earthquake sequence, California: Control of aftershocks and postseismic deformation. J Geophys Res, 88: 6477–6490
Talwani P. 1997. On the nature of reservoir-induced seismicity. Pure Appl Geophys, 150: 473–492
Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. Geology, 10: 611–616
Utsu T. 1966. A statistical significance test of the difference in b-value between two earthquake groups. J Phys Earth, 14: 37–40
Wang Z T, Zhang H, Guo Y C, et al. 2024. Numerical simulation of the influence of the Baihetan Reservoir impoundment on regional seismicity. Appl Sci, 14: 5145
Wiemer S, Wyss M. 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan. Bull Seismol Soc Am, 90: 859–869
Woessner J, Wiemer S. 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. Bull Seismol Soc Am, 95: 684–698
Wyss M, Hasegawa A, Wiemer S, et al. 1999. Quantitative mapping of precursory seismic quiescence before the 1989, *M*7.1 off-Sanriku earthquake, Japan. Ann Geophys, 42: 20
Xu J. 2019. The rheological model in China Seismic Experimental Site. CSES Scientific Products
Zhang G, Wang S, Li L, et al. 2002. Focal depth research of earthquakes in Mainland China: Implication for tectonics. Chin Sci Bull, 47: 969–974
Zhang P Z, Shen Z, Wang M, et al. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. Geology, 32: 809–812

（责任编委：郑勇）