



商·地震山崩多灾难

冯 锐

ShangEarthquake landslides cause multiple disasters

Feng Rui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2023-050>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

2019年全球地震灾害概要

Overview of worldwide earthquake disasters in 2019

地震科学进展. 2020(9): 1–7

2020年全球地震灾害概要

Overview of worldwide earthquake disasters in 2020

地震科学进展. 2021(7): 289–296

地震影响的经济韧性评价研究进展

The progress of the research on economic resilience to earthquake disasters

地震科学进展. 2021(7): 297–303

321响水爆炸的地震学分析及谱比法研究

Seismic analysis and amplitude-style spectrum ratio study of the 21 March blast at Xiangshui

地震科学进展. 2021(5): 215–222

浅谈新形势下云南地区地震台站如何加强防震减灾科普宣传工作

Brief analysis on how to strengthen popularization of earthquake prevention and disaster mitigation in Yunnan seismic stations under the new situation

地震科学进展. 2021(9): 409–412

2017年全球地震灾害概要

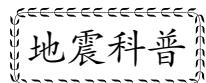
Overview of worldwide earthquake disasters in 2017

地震科学进展. 2018(7): 23–28



关注微信公众号，获得更多资讯信息

冯锐. 商·地震山崩多灾难——漫步地震五千年(3)[J]. 地震科学进展, 2023, 53(12): 594-606. doi:10.19987/j.dzксjz.2023-050
Feng R. Shang: Earthquake landslides cause multiple disasters[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2023, 53(12): 594-606.
doi:10.19987/j.dzксjz.2023-050



商·地震山崩多灾难 ——漫步地震五千年(3)^{*}

冯 锐^{*}

(中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要 商周期间的地震记载多在川西—陕甘交界地区, 山体垮塌十分普遍。现代科学将之划分成 4 种主要形态: 落石、崩塌、滑坡和泥石流, 其中以地震致崩塌和滑坡的危害最大。具体地介绍了汶川、湔江、叠溪和磨西地震山崩的灾情, 特别是王家岩滑坡的力学机制; 分析了历史上滑坡、河流改道、堰塞湖溃坝三大次生灾害; 说明在青藏高原的推挤作用下, 该区岩体的反复破裂是致灾元凶。

关键词 滑坡; 河流改道; 堰塞湖溃坝

中图分类号: P315 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7780(2023)12-0594-13

doi: 10.19987/j.dzксjz.2023-050

Shang: Earthquake landslides cause multiple disasters

Feng Rui

(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

Abstract Most of the earthquakes recorded during the Shang and Zhou Dynasties were in the West Sichuan-Shaanxi-Gansu border area, where mountain collapses were very common. Modern science has classified the phenomenon of mountain collapse into four main forms: rockfall, rock avalanche, landslide and debris flow, of which rock avalanche and landslide caused by earthquakes are the most dangerous. Specifically, we introduced the disasters of Wenchuan, Jianjiang, Diexi and Moxi earthquakes, especially the mechanism of Wangjiayan landslide, and focused on the occurrence of three major secondary disasters: landslide, river diversion and dam-break of barrier lake. It is pointed out that the site conditions of thrusting and repeated rupture on the Tibetan Plateau were the key reasons of the disaster.

Keywords landslide; river diversion; dam-break of barrier lake

0 引言

花木兰(图 1)是中国古代巾帼英雄的代表,《木兰诗》有文:

旦辞爷娘去, 暮宿黄河边。不闻爷娘唤女声,
但闻黄河流水鸣溅溅……万里赴戎机, 关山
度若飞。

经考证^[1]: 古文里的“关山”是在《乐府诗集》

* 收稿日期: 2023-04-14; 采用日期: 2023-06-15。

* 通信作者: 冯锐(1941-), 男, 研究员, 主要从事地球物理学的研究。E-mail: fr97214@sina.com。





图 1 花木兰^[2]
Fig. 1 Mulan Hua^[2]

里第一次出现的,原本仅指平凉、华亭至陇县的一小段山区。后来,关山统指陇山,现在常称六盘山,木兰代父从军就是到陇山。汉乐府里还同时另有一曲《关山月》,描写了出征陇西的士兵思念妻子的情景。之后,“关山”一词才发展成边塞、边关的代名词。

历史上,陇山一直名噪天下,尤以陇西地区为最。与一马平川的中原相比,陇西的山峦叠嶂、白雪

皑皑,大河上下巨浪滔滔。一望无垠的密林郁郁葱葱,直把苍生带入脱凡的洪荒圣地。早自商周始,陇山、祁连山和岷山山脉便被推崇为昆仑仙境,一直被祭拜成西王母的瑶池天堂,毛泽东诗词中的“横空出世莽昆仑”、《山海经》中的“昆仑山”都指这里。那些斑驳陆离的美景无不与这里的一山一水、一草一木息息相关,衍生出自白娘子盗仙草、西王母蟠桃会、驾鹤西去等大量神话典故。故而商朝 1600—1046 BC(公元前)崇尚的社会理念是,万物皆有神灵——无神不祭祀,无事不占卜,一直影响到后世。

伏羲的故乡天水、农历五月十三日的龙诞日,至今仍在祭祀。羌、汉两族也在这里同根同源,“禹兴于西羌”出于司马迁之笔。后来,一部分人流向青藏、云贵,成为藏族、彝族祖先,一部分走向泾河、渭河,发展成为周的先祖。后者在豳和周原(今宝鸡)定居后,发展成奴隶社会的鼎盛诸侯,武王伐纣建周(1046—256 BC),成为中国历史上第一个也是唯一的只称王不称帝的朝代,其 800 年的历史最长。信奉天命和正义的诸子百家,为社会提供了强大的精神支柱。

在世界其他古文明消失之际,我国仍能留下这一时期的某些强震记载,弥足珍贵(图 2)。



图 2 商周时代的地震分布
Fig. 2 Earthquake distribution in the Shang and Zhou Dynasties

1 地震与山崩

1.1 地震活动

中国地震的绝大多数发生在青藏高原及其边缘地区,具有震级大、次数多、分布广等特点。而青藏高原东北缘的拐弯处——陇西地区,刚好处在人文

历史和地震活动的重合部位(图 3),于是成了中国地震文化的发祥地。不仅有着最长久的地震记载,而且许多人文哲学观也诞生于此。

扩大一下时空范围,该区强震分布上的一个有趣的特点便愈发明显(图 4):以天水、陇南一带为中

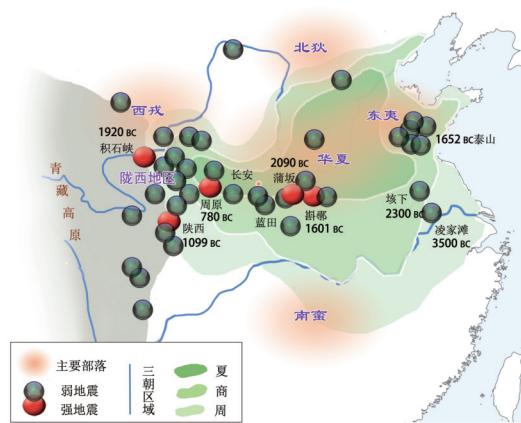


图3 先秦时期的强震分布

Fig. 3 Strong earthquake distribution before Qin Dynasty

心存在一个巨大的十字形——北头 1920 年海原、南头 2008 年汶川、东头 1556 年华县、西头 1927 年古浪都是 8 级 的大地震，中心区更有 1654 年礼县和 1879 年文县两次 8 级大地震。这对掌握该区地震活动规律，自是重要。

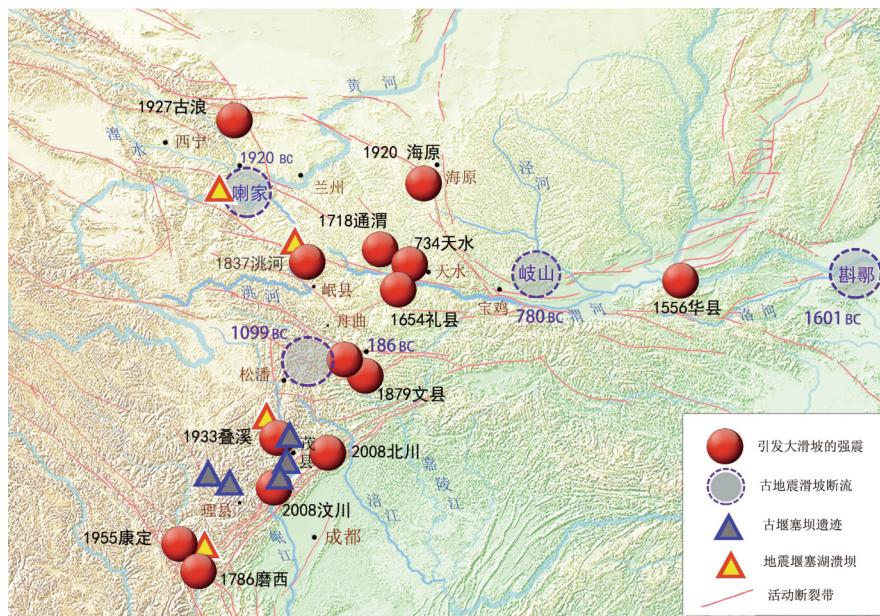
事实上，地震震中的十字形分布并非主观幻影，而是有着大地构造的演化背景。东西一线原本是中生代(200—140 MaBP, 距今百万年, 标注 MaBP) 块

体在古祁连洋—古秦岭洋部位的拼合线(地表对应西秦岭北缘)，南北一线则是新生代 50 MaBP 以后青藏高原对东侧地块的碰撞线(地表对应岷山—龙门山)。两条不同地质时代的、深达下地壳上地幔的巨型构造线在这里交汇，便造成了深浅部位的“立交结构”——深层由东西向的结构主导、浅层以南北向为主，相互作用和影响，遂导致了无穷的祸害。“立交结构”的问题我们还会谈及，是掌握深部构造的一个基本概念。

从震灾上看，仅上述 6 次 8 级大地震中的遇难者便超过 140 万，山体垮塌的影响最大，本篇作重点讨论。

1.2 山崩

我国山地约占国土总面积的 1/3，地震的山体垮塌(古文称“山崩”)以川西—陕甘交界，即陇西地区最突出(图 5)。公元前 26 年—1989 年，在该地区的 147 次 6 级以上地震中，114 次地震造成山体垮塌，占总数的 77.5%^[3]。该区的地貌特征是坡陡谷深。岸坡的相对高差平均在 1000~1500 m，最大相对高差 5000 m。岷山的雪宝顶，高差 5588 m；康定的贡嘎山，高差 7700 m。都属于“蜀道之难，难于上青天”的地方。

图4 地震滑坡的主要震例分布^[4]Fig. 4 The main earthquake cases of earthquake landslides^[4]

山区地震，除却常见的建筑倒塌、土壤液化、地表裂缝等破坏外，次生的地质灾害也很普遍。譬如 2008 年汶川 8 级地震的滑坡、崩塌、泥石流和堰塞湖就多达万余处，直接遇害者约 2 万人，仅一个单体

滑坡就能够造成 1000 多人的罹难^[5]。2022 年 9 月 5 日泸定 6.8 级地震，房屋倒塌的致死率只有 20%，而山体垮塌造成的遇难人数超过 80%，远超过通常 1/3 的上限。



图 5 崩塌、滑坡和泥石流现象

Fig. 5 Rock avalanche, landslide and debris flow

现代科学把“山崩”现象划分成 4 种主要形态——落石、崩塌、滑坡和泥石流(图 6)。

其中,以地震导致的崩塌与滑坡危害最大,二者

的差别在于滑坡存在一个滑脱面,覆盖体会顺着倾斜面下滑。泥石流较少见,仅在降雨大的情况才会发生。通常情况下,山体的平衡是靠岩体间的若干锁固点来维系垂直方向重力的。糟糕的是,地震波偏偏作用在它的水平方向,于是就出现了“地动山摇”现象。地震波的水平向剪切力的巨大程度往往超乎人的想象,能够轻而易举地撕裂岩体的锁固段,或导致上覆盖层的下滑,或外抛滑坡体,山顶处的震荡幅度还容易出现 1.5 倍以上的放大……当然,重大工程对边坡稳定性都会采取特殊的加固措施,但对于像汶川的长达 90~240 km、垂直和水平位错分别高达 6.8 m 和 4.8 m 的地震断裂,任何人工措施都无能为力,只能避让。



图 6 山体垮塌的 4 种形式

Fig. 6 Four forms of mountain collapse

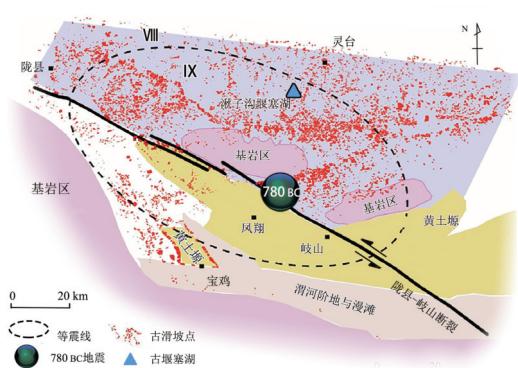
2 地震的三大次生灾害

2.1 滑坡

陇西地区的滑坡和崩塌自古常见,西周成王九年(1034 BC)就有“老君山(今武山)崩裂,成乱石峡”(《武山县志》)的记载,诱发因素未必是地震。而地震引起的坍塌都会有较重的灾情,比如西周 780 BC 的岐山地震曾造成“三川竭,岐山崩”,即泾河、渭河、洛河被堰塞坝堵塞而断流,缘于岐山发生大量滑坡。近年,对这次地震做了考古调查^[6],发现山体的滑坡确实相当严重和普遍,仅岐山陇县一带滑坡密集区内就有 6876 处,总面积高达 643 km²(图 7),还在湫子沟形成了一个堰塞湖。

相比之下,2008 年汶川地震的滑坡范围更广,总面积已达 2 万 km²^[7],其中北川的王家岩滑坡是我国近年最严重的地质灾难,举世罕见。需要多说几句。

5 月 12 日 14 时 28 分发生主震的时候,王家岩的岩体并没有坍塌,滑动面也未贯通,是在主震后的

图 7 西周 780 BC 岐山地震的滑坡分布^[6]Fig. 7 Landslides of the 780 BC Qishan earthquake in Western Zhou Dynasty^[6]

约 10 分钟才突然发生垮塌的。由于龙门山断裂带是逆断层位错,上盘地层便在主震破裂的 96.57 s 内被瞬间上抛,导致岩体失重——颗粒间、块体间、滑体和滑床间的正压力大大降低,甚至达到零值。而地震波的持续振动时间却大大超过 2 分钟,缘于面波、尾

波和自由震荡等续至波的周期长、衰减慢,致使持续时间远大于主震破裂时间。这就造成了岩体仍然在处于反复地振动状态,应变能在继续快速地聚积,微裂隙的扩展使得高应力更加集中到某个点位上。当最顽固的支撑点被撕裂的瞬间,聚集已久的、多余的应变能量便会以岩爆的形式释放出来,岩体在悚人的轰鸣中化成碎片继而抛掷到天空^[8]。正如现场群众所见:抛掷出来的滑坡体、岩屑流和粉尘迅速飞起来,超覆到老县城上空,仅几秒钟便遮天蔽日地砸下来(图8)。数百间房屋被掩埋,6层以上建筑约有30幢被摧毁,1600余人突遭劫难。地上的巨型堆积体纵长400 m、宽400 m、厚约30 m,体积约480万m³^[5]。

这当然还不是灾难的全部。水平抛射的滑坡体在飞行过程中会压缩下部的空气,从而形成一个巨型的气垫,并在它的前部生成冲击气浪击毁更多物体。北川王家岩气浪所击毁的地带呈宽约100 m的



图8 2008年北川王家岩滑坡现场

Fig. 8 Wangjiayan landslide site in 2008 Beichuan

弧形,造成了建筑残骸一致地都向外侧倾倒。图9是一幅珍贵的北川老城旧照,拍摄于大震的8个月前,美好家园的建筑鳞次栉比。地震后的滑坡覆盖区和气浪击毁区已标在图中,右下角的蓝色屋顶已经在图8的相应位置上变成残骸碎片。

按地震学的研究,北川的地震烈度定XI度,峰值加速度大于1 g (g是地面物体的正常重力加速度值,物体在-1 g时是失重态)。

对滑坡的动力学过程做了工程地质学研究^[5]:利用地震台站的记录,确认滑坡体被水平抛掷的位置是在800~1000 m的高程处(图10),地动加速度已达到约1.2~2.5 g,滑坡体纵长约200 m。滑坡体经断层逆冲的上抛和岩爆,已由崩塌块体变成碎屑流,最终以高速远程滑坡的复杂形式飞到天空中。滑坡体的下落并不是简单的自由落体运动^[9],由于川西地区的深沟谷地地貌会造成局部的空气封闭,于是滑坡体下落的时候便在底部形成了一定厚度的空气压缩

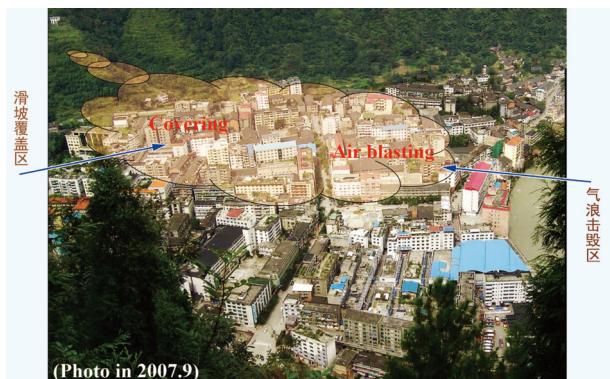


图9 王家岩滑坡体对北川的覆盖^[5]

Fig. 9 Wangjiayan landslide covering Beichuan^[5]

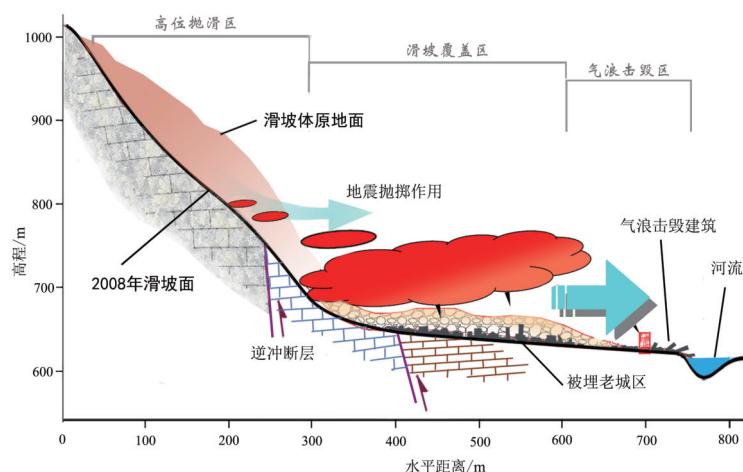


图10 北川王家岩滑坡剖面^[5]

Fig. 10 The section of Wangjiayan landslide in Beichuan^[5]

区, 压缩空气又会给予上覆体一个托举力, 气垫效应 (air cushion effect) 随之出现: 滑坡体会与压缩空气同时运动, 被隔离开的上下两种物体间的摩擦力便大大减小, 而气垫的擎托力又会随着滑坡体的下落变得愈发增大, 于是崩塌碎屑的空中飞行距离也就变得很大, 王家岩滑坡的凌空滑程为 400 m。这与泥石流借助水体在地面上蠕动前行, 有着完全不同的机制。

滑坡虽有多种类型, 但以高速远程滑坡的破坏力为最强, 且不止一起: 映秀—汶川公路滑坡^[5, 8], 发生在大震后的 16 小时, 1000 人遇难; 青川的东河口滑坡^[10], 自高程约 1000 m 处抛出, 体积约 1000 万 m³, 高速碎屑流飞过了下寺河, 抵达对岸后又撞击折返, 形成了两个堰塞湖, 最终的凌空滑程逾 2400 m 之巨! 掩埋了 7 个村庄, 780 余人死亡。

2.2 河流改道

商朝留下来的文物资料并不多, 地震记载仅有两次: 约 1601 BC 的酓鄩 (zhēn xún) 地震和约 1099 BC 地震。前者的位置已有明确的考证和旁证材料^[11]。后者诸多不清, 由于地震发生在商末周初之际, 商帝纪年的《今本竹书纪年疏证》仅有“夏六月, 周地震”六个字, 周王纪年的《吕氏春秋》有“周文王立

国八年, 岁六月, 文王寝疾五日而地动, 东西南北, 不出国郊”, 以前一直将它们暂时作为两次地震录入。《夏商周断代工程》完成后, 笔者才发现两份史录实为同一次地震, 时间应该统一订正为“约 1099 BC”。

不解的困惑在于, 地震位置何在?

估计在川西北, 但无证据。

十余年前, 天外传音: 沱江上游发现了一座大型地震堰塞坝和滑坡遗迹! 而且, 这次古地震很可能与岷江改道、三星堆变迁有关。

山区里的这个遗迹是清华大学水利专家们发现的, 公布在 2010 年《山地学报》上^[12]: 沱江现称之为“湔(jiān)江”的干流实际上是古岷江(图 11)。它的源头白水河是个断头河, 对侧的雁门沟是个反向河, 根据卫星影像、高程横纵剖面、水流量计算和现场考古, 基本认定此处的堰塞坝和滑坡遗迹就是由古地震造成的。故有结论: 古岷江原本流入沱江, 地震造成的堰塞坝在雁门附近堵塞了岷江上游, 江水改由雁门—汶川之间的一处低矮缺口处溢出, 然后借道了杂谷脑河, 转向南流经映秀镇, 再由都江堰进入四川盆地。《尚书·禹贡》有“岷山导江, 东别为沱”, 亦为旁证。

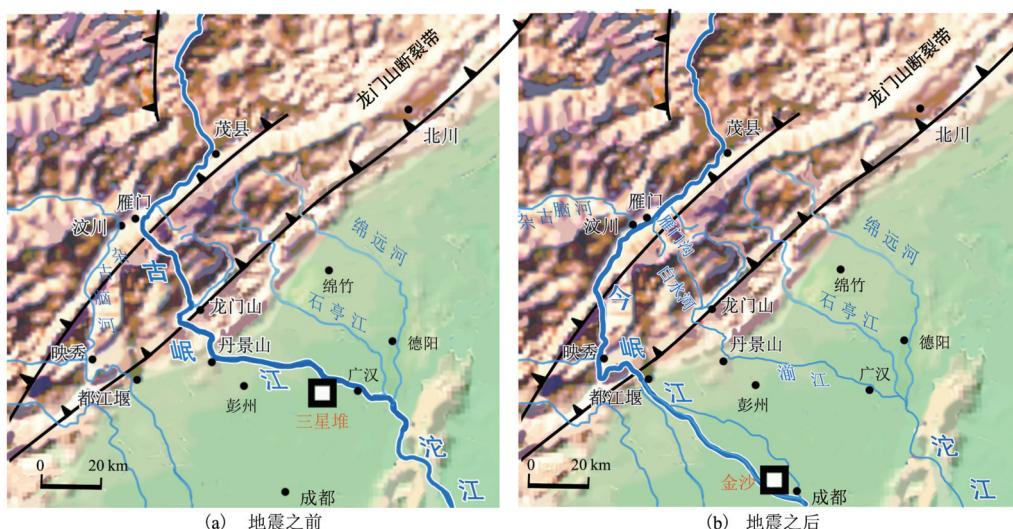


图 11 岷江改道^[12]

Fig. 11 Minjiang River diversion^[12]

岷江改道后, 原来位于江水侧畔的三星堆文明 (1500—1000 BC) 渐渐消亡(2022 年对三星堆 K4 坑的测试年代为 1199—1017 BC)。古人陆续西迁至新的岷江江畔, 才出现了金沙文明(1200—650 BC)。新

河道地区未见河床加深的证据, 却有江水漫流、洪水频发的记录, 直到战国(251 BC)兴建了都江堰。

在各种可能的候选中, 约 1099 BC 的地震为最佳, 推测其位置大约在川西北—陕甘交界处, 即龙门

山断裂带北端。它的时间、地点、强度和史料都比较符合现有资料，况且岷江河道至今还存留多处古堰塞坝的遗迹^[4]（图4）。

天下大事，经常无独有偶。

若说沱江的“湔江”意味着“从前的江”，那么今天的北川也有一条同名同姓的“湔江”，也有一座大型堰塞体把河水改道了180°，上覆地层恰恰是王家岩滑坡体（图12）。

这个发现颇具戏剧性^[13]：2008年5月12日大震之后的9月24日，北川偶然发生了一次严重的泥石流，大石块与泥石流堆积在北川和擂鼓镇之间的垭口，出露得非常清楚。在后来的地震纪念馆开挖地基时，又在这个地方发现了一层层古泥石流的遗迹。这就证实了先前的推测：北川至擂鼓镇之间的狭窄山沟本来就是一条由古地震引发泥石流淤积的古河道，它的堵塞导致了湔江河道在老城区呈V字形180°大转弯，掉头北流（图13）。

这说明，北川老城建在了松软的古代堰塞体上，糟糕的是，它又位于龙门山断裂带的上盘，王家岩大滑坡就发生在这个地方，这也是破坏严重、不少建筑因土壤液化而沉入地下的地质原因。

不得不多说一句，北川的情况远不是个例。由于西部山区山多地少，地震滑坡、地震崩塌会天然地形成一块局部的地基松软体，人们便择机耕地播种、建立了村落。如何防范西南地区的大量地质隐患需要认真考虑。



图12 卫星判读的北川河流改道^[14]

Fig. 12 Satellite readings of river diversions in Beichuan^[14]

2.3 堰塞湖溃坝

堰塞湖一旦溃坝，后果不可估量。

有据可查的，该地区就发生过4起：1920 BC 青海积石峡（喇家）、1786年四川磨西、1837年甘肃洮河和1933年四川叠溪地震的溃坝（图4）。

叠溪于1933年8月25日发生7.5级地震，唐代重镇叠溪整体沉入岷江，更有十几处堰塞坝截流了岷江，大堰塞湖3处。大小两个海子的叠溪湖坝体高出岷江160 m，库容近1亿m³（图14）。一个半月后的10月9日晚7时许，叠溪湖溃坝，大坝以上的水头高60 m，水流浓浊如烂泥，腥臭刺鼻。汹涌的浊浪于是夜9时到茂汶，水头高约26 m。11时到威旧，子夜冲到汶川，水头高约20 m。次日凌晨3时抵达灌县，洪峰仍高12 m，冲坏了都江堰的飞沙堰，灌县2500多人死于洪水，占该地震罹难总人数9293名的27%^[3, 15]。

没有人料想到更大的罪孽还在后头，因为叠溪堰塞湖是在一个古堰塞体上形成的。1933年的溃坝又激发了古堰塞体的活化，后续灾难竟然又持续了半个多世纪^[16]：

- 1936年8月21日，特大洪水的冲刷切割了古坝体，堰塞坝溢流成灾，库水水位下降20 m左右。
- 1985年6月15日，暴雨和山洪引发叠溪大小海子同时溃坝，造成建国以来岷江上游的最大洪水。高6 m的洪峰冲毁索桥17座、小型水电站11座、提灌站21个以及较场至飞虹桥的公路，通往松潘的交通亦中断。

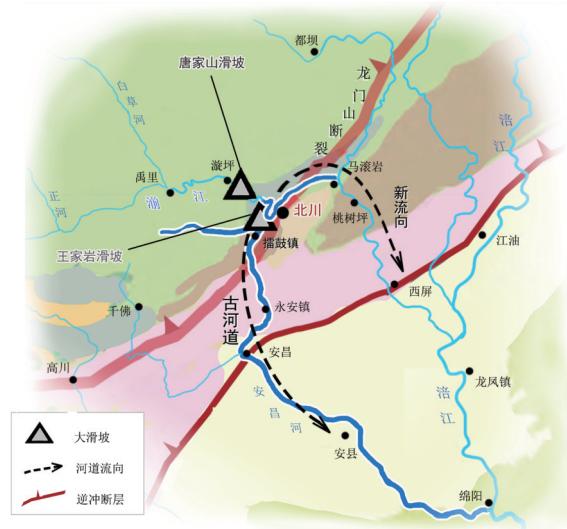


图13 北川的河道变迁

Fig. 13 River changes in Beichuan



图 14 1933 年叠溪地震残留的堰塞湖, A 指示堰塞坝^[17]
Fig. 14 Barrier lake remaining from the 1933 Diexi earthquake, the barrier dam indicated by A^[17]

• 1992 年 6 月 28 日, 小海子出口处的坝体被洪水切深了 8.72 m, 溢流的洪水一直波及到都江堰下游的改道。

磨西—康定 7.8 级地震发生在乾隆年间的 1786 年。磨西镇的金光湖积水深度约 70 余米, 堰塞坝的土石方约有 60 亿 m³ 以上, 堰塞湖袤延二百余里, 倒灌百余里。震后 10 日, 坝体溃决, 高约 30 m 的水头奔腾疾下, 导致岷江水逆流十里, 大渡河、岷江下游的沿岸漂溺者数以万计。水头到乐山时仍高十几米, 淹没民众数十万人, 洪水一直波及到湖北宜昌才逐渐平息^[18]。

基于历史的教训, 2008 年汶川地震后立即评估

了 33 处堰塞湖的溃堤危险性, 迅速对坝高 100 m 的唐家山堰塞湖排险(图 13), 开槽泄洪的深度达 20 m, 降低了水位 24 m, 化险为夷^[5]。

3 川西灾情重, 原因多

3.1 青藏高原的隆起

印度板块在距今 50 百万年的时候与欧亚板块碰撞, 并不是简单地隆起了一个青藏高原, 更为深刻的是改造和控制了我国整个西部的地质构造和力学状况^[19], 这个运动至今未停, 仍在发挥着改造山河的作用(图 15)。

3.1.1 垂直方向

高原的年均隆升量约 100~500 mm, 造成高原的地壳密度的自然降低, 还牵动了周边物质从深部向高原中心的运移(图 15), 这是由地球的转动惯量守恒所决定的。于是, 在青藏高原的四周就出现了一系列的盆地。即是说, 周围的塔里木盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地和四川盆地等都会不断地沉降, 才能够补偿高原隆升在深部引起的质量亏缺, 以维系全球的大地均衡。与此同时, 高原内部也就涌现出大量的谷地、湖泊、沼泽、洼地和断裂。

上述差异性运动一出现, 地震就来了; 今天安定了, 明天再折腾。

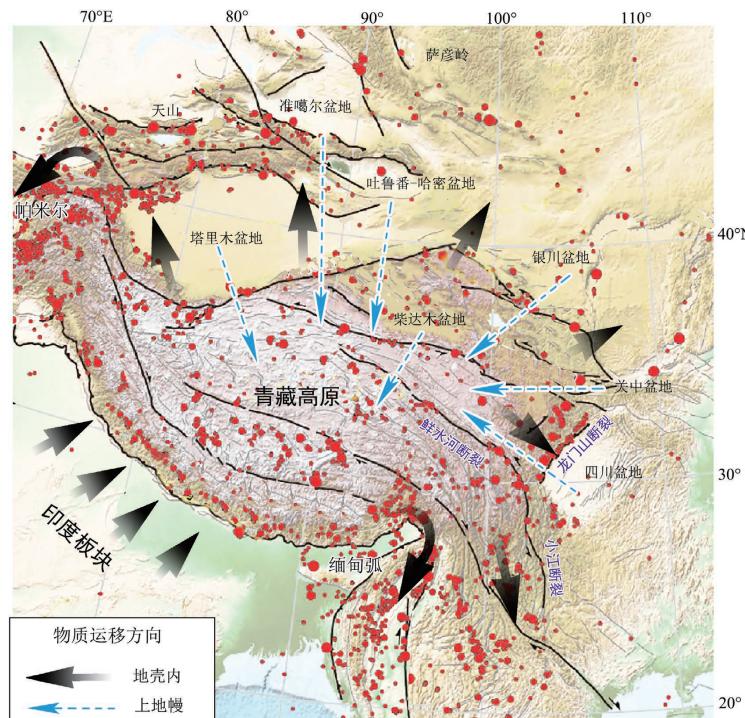


图 15 青藏高原四周物质运移示意图
Fig. 15 Schematic diagram of material transport around the Tibetan Plateau

3.1.2 水平方向

高原的西北侧地区有较大的纵深，延续到天山、萨彦岭和哈萨克斯坦，都是地质力学的调整范围。高原的东侧不同，鄂尔多斯和四川盆地是坚硬稳定的地壳陆块，与青藏高原的关系是硬碰硬的，它们有着明确的拼接或嵌合边界。地震便沿着这条线从北而南一直发展到缅甸，称为“南北地震带”。

3.1.3 重力均衡

高原热乎乎的、流变性强的物质会自动地“向四面坍塌”以降低位能。就像公路上的一堆热沥青，会自动舒展摊平。物质流动到高原的东西两侧后，便受阻转向，图像上就出现了两个奇怪的“弧形犄角”：西侧的叫帕米尔弧深震区，东侧的叫缅甸弧地震区，活动强度都很大（图 15）。

3.2 川西地区的力学环境

该区地质架构的基本线条是 3 大断裂的 Y 字形——北东向的龙门山断裂、北西向的鲜水河断裂和南北向的安宁河—小江断裂^[20]，它们汇聚的焦点在康定（图 16）。3 大断裂中，龙门山断裂带的山体垮塌最为突出，完全是由它的走向同高原的东向位移呈垂直关系所决定，更因断裂带具有逆冲性质而加剧（图 17）。

逆断层的危险性，不容小觑：

（1）GPS 数据显示：西侧高原的变形速率每年 10 mm 以上，而龙门山断裂带的变形每年不到 1~2 mm。这说明：有很大幅度的应力加载和形变能量已经积累在这里了，至今如此^[19]。1657 年的 6.2 级汶川地震，是迄今可追溯到的龙门山断裂带的最早强震，其后的几百年间一直无强震——出现了表象上的“地震平静区”。由于岩石存储应变能的范围是有限的（上限大约为 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{m}^3$ ），于是 2008 年汶川地震活动便表现出了龙门山断裂带的整体卸能特点：主震的单侧破裂向着北东方向延展约 350 m，后续的位错发展到整个约 500 km 长的断裂带，2013—2023 年的地震活动已经向南延到芦山和磨西，这都是非常常见的调整过程。今后的破裂位置自然还会出现在目前的地震空白段。

（2）调查表明，约占总数 87% 的山体崩塌、滑坡发生在龙门山逆断层的上盘，即汶川—北川以西地区。原因在于，逆断层在位错的时候（图 17），上盘位移存在很大的顶部自由空间，这个分量不仅能抵消掉了一部分上覆岩体的重力，还会将过剩的能量使其上抛，甚至引发岩爆。

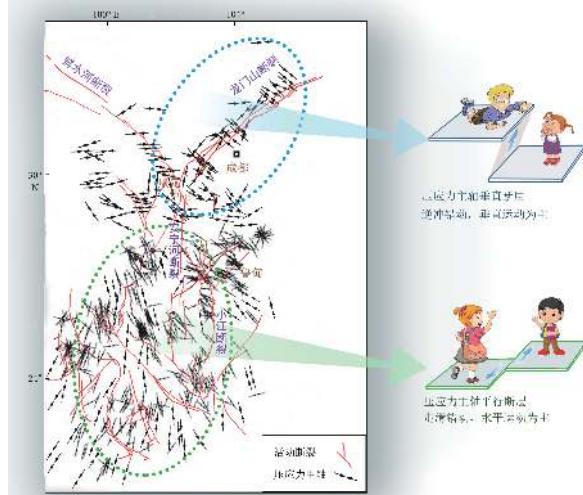


图 16 震源主压应力轴分布和位错方式^[20]

Fig. 16 Main compressive stress axis and dislocation mode of seismic source^[20]

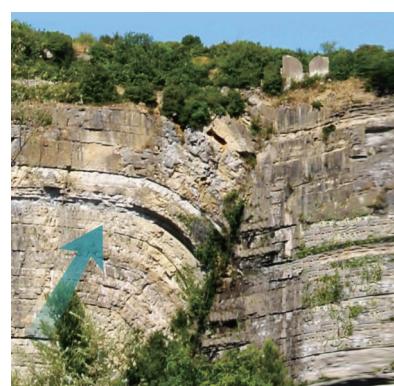


图 17 断层的逆冲错动（左侧是断层上盘，右侧为下盘）

Fig. 17 Dislocation of reverse fault

于是，有两个情况就要意识到：

第一，同样的 8 级地震，山区的危害程度会更大。

因为地震的震级是根据地震弹性波来计算的，它只占地震位错所释放总能量的很小一部分（大约 1%~5%）。山区地震所引起的非弹性能量的消耗要占更大一部分，比如山体变形、岩石粉碎、摩擦生热、岩块抛掷和地层抬升后的位能改变等，它们都不会产生地震的弹性波，也就包含不到震级的计算中。

第二，另外两个大断裂——鲜水河断裂和安宁河—小江断裂，不容易引起大型崩塌和滑坡。

因为它们的走向已经转为北西或南北方向了（图 15, 图 16），与青藏高原的运动方向和震源主压应力轴近于平行，地震震源机制已经变成以水平位错为主的走滑性质^[3]。水平位移是不会引起山体大型滑坡的，更不会抛掷岩体到空中。这就同龙门山断裂带的逆冲位错全然不同了。

3.3 一个被反复撕裂的伤口

地震的发生,犹如在大地上撕裂一个伤口,而伤口的愈合——地层趋于稳定、颗粒胶结和结构固化至少要经过千百万年才有成效。但印度板块以每年约45 mm的幅度北移,推挤了青藏高原以每年约10 mm的运动量在移动,不过百年,位移量就可以达到一次6级地震的变形幅度!而现在的高原地震大体几十年就折腾一次,相当于刚被撕裂的伤口还没有结痂,又被撕开!川西地区的山间公路修了又裂,裂了又修,就是这个道理。

这种情况下,对我国西南地区地质隐患的动态监测便尤显重要。

现已查明的川西地区大型古滑坡有357处,存在105 kaBP、25—20 kaBP(距今千年,记为kaBP)和近现代的3个高发期^[21]。汶川地震前的地质灾害隐患共有5430处(其中滑坡3572处、崩塌600处、泥石流737处),地震后的共15000处,发现新的4970处(其中滑坡1701处、崩塌1844处、泥石流304处、不稳定斜坡1093处)。汶川地震使地质灾害隐患点增加了237%,其中崩塌体增加了617%,远远超过其他灾种。图18给出了对四川10个极重灾区^[5]和北川县的灾害调查结果^[22]。

滑坡的空间分布示于图19^[7, 21]。这些滑坡已具陈旧性质,它们的复活变形速率与外界影响因素密切相关。坡脚开挖、扩展空间是社会上一个很常见的事情,此类活动非常容易造成滑坡的迅速解体破坏,而水的入渗、河流侵蚀等更导致滑坡缓慢蠕滑复活。

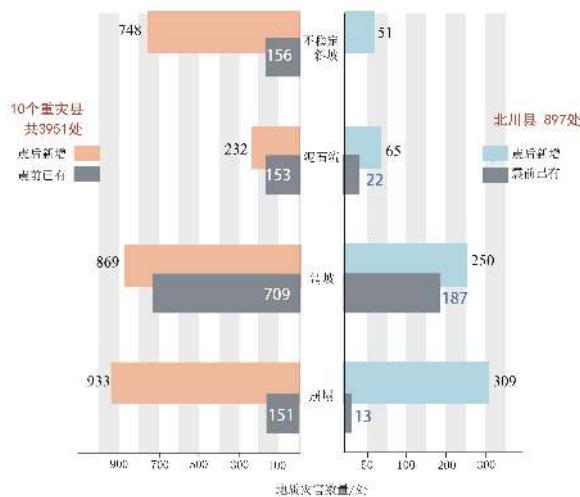


图18 汶川地震前后的地质灾情^[5, 22]

Fig. 18 Geological disasters before and after the Wenchuan earthquake^[5, 22]

目前,这一地区适宜工程建设的“安全岛”已基本无地可选。不少决策是把社会需要和经济发展的因素放在地震地质条件之前的,连地震断层两侧的“避让带”从40 m退让到25 m的最低要求都难以落实。更何况汶川地震灾区的93%的人口生活在高程500~1000 m的山地,83%的地区属于较不适宜和不适宜的居住点^[23]。这些问题的解决,都需要政府部门做统筹考虑。

说明一点,受到了大雪山(岷山、羊拱山、邛崃山)的阻隔,上述研究的区域还没有达及若尔盖草地(图20)。那里原本是个孤立的古湖泊,大约在30—50 kaBP,古湖泊的上下两端被黄河切穿而泻湖。盆地变成草地沼泽的时间大约是在1.5—1.0万年前,冰川滑坡和地震滑坡都在四周留有堆积物。有趣的是,黄河河道在这里也出现了180°的大转弯,也发生过河道迁徙^[24-25]。

行文至此,红军形象夺目而出,倍觉亲切。

1934—1936年红军经过这里(图20),当时在若尔盖草地和腊子口一带发生过3次6级以上的强震和几十次有感地震,不知道他们遭遇没有,遇到麻烦了吗?……另外,三军会师的将台堡正是1920年海原大震的极震区。据村民回忆,红军曾在当地惩处了海原地震中的贪官污吏,发动群众建立了红色政权……

今天,我们能安静地在这里研究地震,忘不了红军为这片热土洒下的鲜血,忘不了他们为之奋斗的理想。

伟大的中国工农红军万岁!

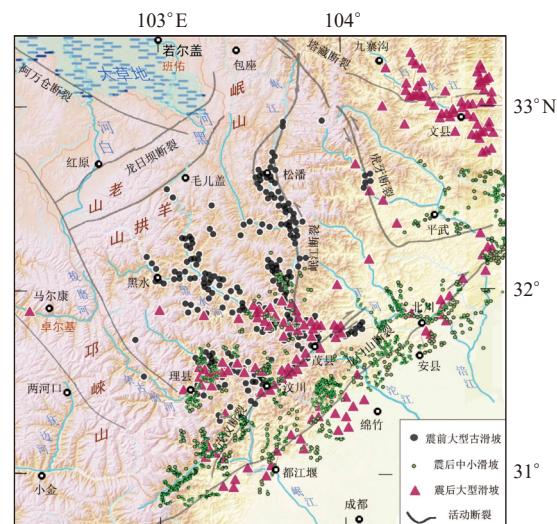


图19 地震滑坡点的分布^[7, 21]

Fig. 19 Distribution of landslide sites induced by earthquakes^[7, 21]

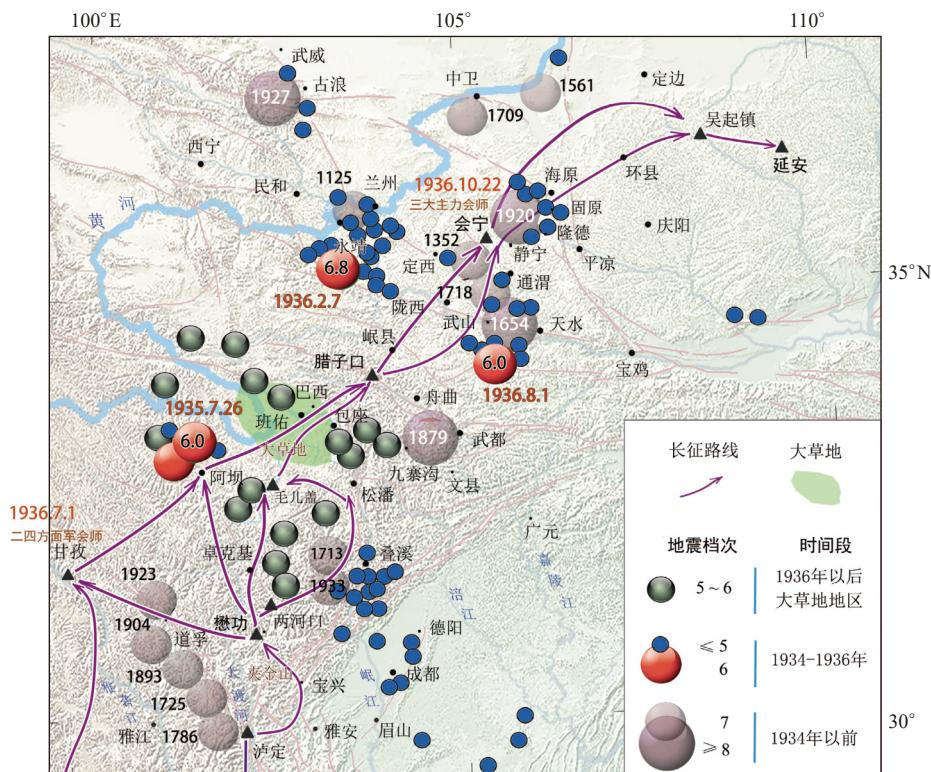


图 20 长征路上的地震活动

Fig. 20 Seismic activity on the Long March

参考文献

- [1] 景灏.关山•陇山•六盘山[C]//陇山文化发展论集.武汉:武汉大学出版社, 2015: 67-74
Jing H. Guanshan, Longshan, Liupanshan[C]//Proceedings of Conference of Longshan Cultural Development. Wuhan: Wuhan University Press, 2015: 67-74

[2] 皮影花木兰 [EB/OL]. [2023-04-13]. <https://so.redocn.com/shiliang/c6a4d3b0cab8c1bf.htm>
Mulan Hua[EB/OL]. [2023-04-13]. <https://so.redocn.com/shiliang/c6a4d3b0cab8c1bf.htm>

[3] 乔建平,蒲晓虹.川滇地震滑坡分布规律探讨[J].地震研究, 1992, 15(4): 411-417
Qiao J P, Pu X H. A preliminary study on the distributive regulation of seismic landslide in Sichuan and Yunnan[J]. Journal of Seismological Research, 1992, 15(4): 411-417

[4] 王兰生,王小群,许向宁,等.岷江上游近两万年前发生了什么事件[J].地学前缘, 2007, 14(4): 189-196
Wang L S, Wang X Q, Xu X N, et al. What happened on the upstream of Minjiang River in Sichuan Province 20000 years ago[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(4): 189-196

[5] 殷跃平.汶川八级地震地质灾害研究[J].工程地质学报, 2008, 16(4): 433-444
Yin Y P. Research on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 433-444

[6] 杜朋.岐山陇县一带历史滑坡对BC780年岐山地震震源参数的指示意义[D].北京:中国地震局地震预测研究所, 2020
Du P. Significance of historical landslides in Qishan Longxi area to the focal parameters of BC780 Qishan earthquake[D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, CEA, 2020

[7] 陈晓利,邓俭良,冉洪流.汶川地震滑坡崩塌的空间分布特征[J].地震地质, 2011, 33(1): 191-202
Chen X L, Deng J L, Ran H L. Analysis of landslides triggered by Wenchuan earthquake[J]. Seismology and Geology, 2011, 33(1): 191-202

[8] 赵晓彦,胡厚田.汶川大型地震滑坡的类型及启程剧动机理研究[J].工程地质学报, 2015, 23(1): 78-85
Zhao X Y, Hu H T. Classification and sudden initiation mechanism of large landslides triggered by 2008 Wenchuan earthquake[J].

- Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1): 78-85
- [9] 李清山, 唐红梅, 陈洪凯. 群发性崩塌气垫效应研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(5): 983-988
Li Q S, Tang H M, Chen H K. On air cushion effect of the mass avalanches[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011, 30(5): 983-988
- [10] 孙萍, 张永双, 殷跃平, 等. 东河口滑坡-碎屑流高速远程运移机制探讨 [J]. 工程地质学报, 2009, 17(6): 737-744
Sun P, Zhang Y S, Yin Y P, et al. Discussion on long run-out sliding mechanism of Donghekou landslide-debris flow[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(6): 737-744
- [11] 冯锐. 地震考古: 走进深远的时空 [J]. 地震科学进展, 2020, 50(12): 39-49
Feng R. Archaeoseismology: Towards far-reaching time and space[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2020, 50(12): 39-49
- [12] 范念念, 吴保生, 刘乐. 地震导致河流改道与古蜀文明的变迁 [J]. 山地学报, 2010, 28(4): 453-462
Fan N N, Wu B S, Liu L. River avulsion by earthquake and the transition of ancient Shu civilization[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(4): 453-462
- [13] 姚少丞. 地震、大洪水、古文明 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(5): 1070-1072
Ji S C. Earthquake, great flood and ancient civilizations[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(5): 1070-1072
- [14] 最新航空光学图像显示北川县城及周边区域一年来的变化 [EB/OL]. [2023-04-13]. http://www.ceode.cas.cn/kycg/kydt/201007/t20100715_2903551.html
The latest aviation optical images show the changes in Beichuan County and surrounding areas over the past year[EB/OL]. [2023-04-13]. http://www.ceode.cas.cn/kycg/kydt/201007/t20100715_2903551.html
- [15] 洪时中. 叠溪地震考证与研究的最新进展 [J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(2): 185-194
Hong S Z. Resent advances of research on Diexi earthquake[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(2): 185-194
- [16] 王兰生, 杨立铮, 王小群, 等. 岷江叠溪古堰塞湖的发现 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 1-11
Wang L S, Yang L Z, Wang X Q, et al. Discovery of huge ancient dammed lake on upstream of Minjiang river in Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2005, 32(1): 1-11
- [17] 地震堰塞湖图片 [EB/OL]. [2023-04-13]. <https://www.nipic.com/show/5277152.html>
Barrier lake after the earthquake[EB/OL]. [2023-04-13]. <https://www.nipic.com/show/5277152.html>
- [18] 江在雄. 1786 年大渡河地震、水患及救灾 康定—泸定磨西地震 220 周年 [J]. 四川地震, 2006(3): 4-9
Jiang Z X. The 1786 Kangdin-Ludin-Muoxi earthquake, flood and relief : 220th anniversary[J]. Earthquake Research in Sichuan, 2006(3): 4-9
- [19] 郑文俊, 张培震, 袁道阳, 等. 中国大陆活动构造基本特征及其对区域动力过程的控制 [J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 699-721
Zheng W J, Zhang P Z, Yuan D Y, et al. Basic characteristics of active tectonics and associated geodynamic processes in continental China[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 699-721
- [20] 王辉, 曹建玲, 徐化超. 中小地震震源机制解在青藏高原东南缘地区断层稳定性分析中的初步应用 [J]. 地震地质, 2019, 41(3): 633-648
Wang H, Cao J L, Xu H C. Preliminary application of focal mechanism solutions of small and medium-size earthquakes to fault stability analysis in the southeastern Tibetan Plateau[J]. Seismology and Geology, 2019, 41(3): 633-648
- [21] 吴瑞安. 岷江上游古滑坡复活机理与危险性评价 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2019
Wu R A. Research on reactivation mechanism and harzard assessment of ancient landslide in upper reaches of Minjiang river[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2019
- [22] 王猛, 王军, 江煜, 等. 汶川地震灾区北川县地震地质灾害遥感调查与分析 [C]//中国遥感应用协会 2010 年会论文集. 北京: 中国遥感应用协会, 2010: 249-255
Wang M, Wang J, Jiang Y, et al. Remote sensing investigation and analysis of seismic geological hazards in Beichuan County, Wenchuan earthquake stricken area[C]//Proceedings of the 2010 Annual Meeting of the China Association of Remote Sensing Applications. Beijing: China Association of Remote Sensing Applications, 2010: 249-255
- [23] 国家减灾委员会抗震救灾专家组, 科学技术部抗震救灾专家组. 汶川地震灾害综合分析与评估 [M]. 北京: 科学出版社, 2008
Earthquake Relief Expert Group of National Committee for Disaster Reduction, Earthquake Relief Expert Group of Ministry of Science and Technology. Comprehensive analysis and assessment of Wenchuan earthquake disaster[M]. Beijing: Science Press, 2008

-
- [24] 王云飞, 王苏民, 薛滨, 等. 黄河袭夺若尔盖古湖时代的沉积学依据 [J]. 科学通报, 1995, 40(8): 723-725
Wang Y F, Wang S M, Xue B, et al. Sedimentological basis for the assault of the Yellow River on the Ruoergui ancient lake era[J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(8): 723-725
- [25] 盛海洋. 黄河上游若尔盖盆地区域地质背景与盆地演化研究 [J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2022, 21(4): 91-96
Sheng H Y. Regional geological setting and basic evolution of Zoige basin in the upper reaches of the Yellow River[J]. Journal of Taiyuan Normal University (Natural Science Edition), 2022, 21(4): 91-96