

地震灾区重建中有关水文与水环境问题 的若干思考

王根绪, 程根伟

(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 利用国际上有关大型地震灾区水文过程和水环境变化的研究成果和龙门山区断裂带水循环系统特点, 从地表水循环变化及其对流域水资源形成和分布的可能影响、河道形态与径流过程变化、坡面水动力场的可能变化及其对坡面岩土稳定性与土壤侵蚀的作用、水环境可能变化以及流域水安全与水库生态调度等方面, 讨论了“5.12”汶川特大地震对区域水循环和水资源以及水环境等方面存在的可能影响, 认为在灾后恢复重建过程中, 应重视对流域尺度水循环与水资源和水环境科学的系统研究。

关键词: 地震灾区; 水循环过程; 水环境; 流域水安全

中图分类号: P316 X143

文献标识码: A

位于四川西部与青藏高原东缘接壤地区的龙门山断裂带, 是世界上地质构造运动最为活跃的地区之一, 这里地质构造复杂, 构造断裂和褶皱极为发育, 地质构造对地表岩土体的改造十分强烈, 形成山峦叠嶂、沟谷纵横的地形特点, 相对破碎的地表结构形成该区域地表水系发育, 河网密布。这次发生的“5.12”汶川特大地震, 导致都江堰至青川一带大部分山体发生不同程度滑坡、崩塌以及错动, 地表形成大量裂缝。这次巨大的地质构造运动, 无疑将使得该区域地表岩土结构遭受巨大冲击。据不完全统计, 受灾地区形成不同规模数千处滑坡与崩塌点, 一些大型滑坡堵塞河道构成30多处堰塞湖。该区域原有的地表结构、表层岩土水力性质以及含水层结构和坡面水动力场将产生较大变化, 同时地表覆被状况也发生显著变化。这些变化不仅改变降水-产流规律和表层岩土降水入渗机制, 而且可能导致区域地表水-地下水系统平衡场和水循环规律发生较大改变。已有报道表明, 以泉水消失、瀑布断流、河流改道等为代表的该区域水循环和水资源系统剧烈

变化, 昭示了该区域水循环和水动力与水平衡场可能发生了较大变化。同时, 地震形成的大量堰塞湖的存在, 不仅改变了原有的河道形态和山区河流水动力规律, 而且流域内变化了的水循环体系和水力场对河流两岸岩体的稳定性产生较大影响。由此, 地震灾害导致的水循环、水文过程以及水资源变化, 对重建过程中的经济社会活动以及生态环境恢复等带来一些新的问题, 需要给予关注和考虑。

1 地表水循环变化及其对流域水资源形成与分布的可能影响

受灾地区大都处于龙门山到四川盆地过渡地带, 在地貌单元上包括构造山地、冲洪积河谷平原和剥蚀台地等多种类型, 总体上受该区域地质构造的控制, 在水系统角度, 龙门山是沱江和岷江的分水岭, 四川东、西部主要水文气候界线之一^[1]。因此, 该区域既具有水资源形成区也具有水资源径流和耗散区。一般而言, 大型地质构造运动在重塑地貌格

收稿日期 (Received date): 2008-06-23.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金重点项目 典型山地水文生态系统水循环多尺度耦合的对比实验研究 (40730634)。[Key Projects of National Natural Science Foundation (40730634).]

作者简介 (Biography): 王根绪 (1965-), 男, 甘肃天水人, 研究员, 主要水文与水资源领域的研究工作。[Wang Genxu (1965-), born in Tianshui in Gansu Province, researcher specialized in hydrology and water resources.] E-mail: wanggx@imde.ac.cn

局的过程中,也极大地改造区域水循环格局和水资源系统。1999年在台湾南投县发生的“9.21”集集大地震($M_w = 7.5$),导致区域内的浊水溪和乌溪流域水文过程、降水-径流关系发生较大改变,并由此影响流域水资源的时空分配格局^[2,3]。

首先,伴随地表破碎化程度加剧或地表土体结构破坏,降水的再分配格局可能改变,由地表破碎和错动形成的大裂隙和大孔隙,一方面使得降水入渗不再遵循原来完整地表的入渗机制,较大幅度增强的地表入渗能力将使得降水的大部分以入渗为主要途径;另一方面水分在土壤剖面的分布和渗透过程以大孔隙优先流为主,水分渗入深度也随破碎带发生变化,不再以原来的饱和带或岩性界面为界。这些变化将直接改变原有的山坡坡面降水-径流关系,形成新的坡面产流过程,主要体现在:坡面汇流可能减少,土壤汇流和地下汇流趋于增加。大量滑坡面的形成,不仅造就了新的裸露地表和松散土体,而且形成了大量新的土壤水分和地下水的排泄面。原来具有较高植被覆盖的坡面转为裸露地表,坡面水循环过程急剧改变,裸露地表的坡面超渗汇流高于原有植被覆盖状况的产流状态。但是滑坡坡脚处大量的松散堆积体,其土壤水力性质取决于堆积体的岩土结构,渗透性和持水能力可能存在较大差异。但一个共同点就在于显著改变了原有的坡面汇流过程。

其次,国内外大量研究表明:地震对地下水系统的影响是十分深刻的,大型地震活动将引起含水层导水性质、含水层结构和岩层透水性质等发生显著变化^[5,6]如台湾集集地震就导致浊水溪洪积扇平原地下水含水层孔隙度和导水系数均呈现下降^[6]。龙门山带由于复杂的地质构造作用,汶川-北川-青川一带山体岩性破碎,结构面和岩体节理裂隙十分发育,基岩裂隙含水层在构造隆起区出露,接受补给后,一部分地下水顺层作短暂运移到地形低洼处或岩体临空截面分散溢出地表,形成山区重要的水源地;主要部分则沿裂隙、孔隙向顺层流动,直至裂隙发育段之下界线或岩层尖灭处,然后回升再沿走向作纵向运动,在沟谷切割处以泉的形式排出地表。因此地下水系统在较短距离内可以完成补给-径流-排泄过程,是山区地表径流形成的重要组成。河谷平原或平坝台地地下水则多以地表水入渗补给为主,周围山地浅层孔隙含水层侧向流入也是重要来源,含水层埋藏浅,水量丰富且较为均匀。这次特大

地震的发生,剧烈的构造运动使得原有的岩体结构面、节理裂隙特性等发生较大改变,并形成新的构造裂隙带;同时,山地进一步隆升而河谷冲洪积平原地带进一步下沉。这些作用无疑将在一定程度上影响地下水系统原有的补给-径流-排泄规律以及原有的地下水和地表水之间的水力关系,地下水含水层特性变化引起地下水运动过程改变和地下水均衡场可能出现再造,并改变区域地下水分布状况。

水循环过程以及流域径流形成规律的改变将直接导致区域水资源形成与分布格局的变化,尽管目前尚未有证据表明区域水文过程和水资源系统发生多大变化,但是依据国内外已有特大地震作用区水资源变化的经验来看,原来的区域水文地质和水资源评价结果可能不再适用于灾后重建的水资源利用依据。需要在震前区域地下水系统分布与运动规律研究成果基础上,选择不同破坏程度地带和水资源不同类型的代表性地带,开展水循环过程变化、降水-地表水-地下水转化关系变化以及地下水系统变化的比较研究,对比分析地下水系统变化及其对供水和其他水循环环节的影响;对比分析不同典型区域水资源形成和转化规律的变化及其对区域供水和生态环境的可能影响,开展可利用水资源变化评价。

2 河道形态与径流过程变化

在青藏高原东南部地震活动易造成河流堰塞湖,这次地震就形成大型河道堰塞湖 34 座。由于山坡岩土破碎和流域水力作用,该区域大型地震往往导致河流两岸岩体大规模崩塌和滑坡,每一次大地震都不同程度对河流形态形成再造。同时,大量河流堰塞湖的出现,无论最终是以自然溢出、自然溃决或是人工方式排水,都不同程度形成河道内局部水流阻滞现象或是河道储水塘湖。河岸再造和河道堰塞湖两方面的影响促使河道形态出现较大变化。问题还在于,已经遭受巨大破坏的山体,在持续余震和雨季强降水和洪水冲刷作用下,在较长时间内其稳定性难以达到一种新的平衡状态,加之本区域原本就属于我国滑坡易发生地带。河岸崩塌和滑坡的危险在较长时期内将仍然存在。

河道形态变化将不仅改变原有河道径流过程,导致河流水文情势明显变化,而且将可能改变流域已有的降水-径流规律和水文特性^[5,7]。河流外在形态变化可能导致新的径流形成条件或径流组分发

生改变,如台湾集集地震后在部分流域发生地下水排泄出口完全转化为补给河流,观测到地下水位急剧下降而河流流量迅速增加的现象。在山区,由于地震活动造成岩体大规模高倾角破坏,将促使基岩裂隙含水层地下水沿破碎带迅速排泄到下端河流,更容易导致河流径流量增加,如台湾“9.21”集集地震和“12.26”恒春地震均观测到区域内河流流量增大现象,平均地表径流增大 $0.7 \text{ km}^{3/6}$ 。河流形态以及径流过程的剧烈变化对于河流管理和水资源开发利用,尤其是已建水库和水电站的运行管理等带来一系列新的问题,诸如径流过程更加不确定,流量的时空分布变异较大而与原有设计方案不匹配等。加强震后相关流域水文过程的观测,掌握变化后河道水系的降水-径流规律和洪水与枯水变化特征,对原有水文规律的校核,是流域管理和水资源与水能资源合理开发利用所必须开展的应对工作。

3 坡面水动力场变化及其坡面稳定与土壤侵蚀的影响问题

由于本区域历史上就属于强地震区,曾发生多次强烈地震,河流两岸山体岩土结构破碎,强烈地震和地震堰塞湖溃坝洪水往往带来大量泥沙。地震引起的次生灾害中,滑坡、泥石流和水土流失占据首要位置,坡面水动力条件变化和水文动态变化是重要的驱动因素。地表岩土结构和覆被破坏,引起坡面水动力特性如流态、流速、水力半径、阻力系数及曼宁糙率系数等将发生改变,同时由于表层水分入渗和径流特性也随之改变,坡面侵蚀机能将发生变化;由于坡面水动力场和山坡岩土力学性质的协同变化,导致坡面岩土稳定性遭受破坏,需要新的水动力条件下塑造新的稳定状态,在地表径流和地下水运动作用下,山坡更容易趋于滑塌,流域水土流失趋于加剧。岷江流域属于泥石流和推移质较多的河流,地震造成山体岩石大量崩塌或滑塌堆积于河谷地带,在地震改变了的径流过程和雨季洪水冲击下,就很容易产生次生泥石流灾害。

选择典型流域,针对不同地表破坏程度坡面,开展山坡水动力场和土壤侵蚀能力的对比观测分析,针对不同地震破坏程度山坡岩土(包括滑坡体)稳定性维护需要,探索具有较强针对性的岩土稳定性保护技术,可能是灾区恢复重建中重要的环境问题。

其中,掌握不同破坏程度山坡的水力学特性和水循环规律、辨识地下水运动特征和地表径流过程及其与大气降水的关系,应该是解决这一重要问题的关键。

4 水环境问题

在强大地应力作用下,地下水环境状态会发生改变,因此捕捉地下水化学场变化信息,是地震预测预报的主要方式之一。这里要谈的是由于地震活动所导致的区域内水环境较长期变化及其对人畜饮水安全的影响问题。地震对区域地貌格局、河道形态以及山体岩土结构的巨大改变,对水环境将可能产生较大影响。国际上一些大型地震灾区的水环境调查与监测表明,水体自然环境特性不同程度会发生改变,如在台湾、日本以及土耳其等地,地震后区域地下水化学观测结果,反映出水化学组分中个别离子含量在地震后可能出现根本性变化^[7,8],在日本神户大地震后地下水中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 离子含量显著升高;在台湾集集地震后,河流中电导率以及 NH_4 、 Mg 、 SO_4 、 NO_3 等含量显著增加,而 F 、 K 和 Ca 等含量显著减少^[9];在冰岛 2002 年发生的 5.8 级地震后 2~9 d 地表水中 B 、 Ca 、 K 、 Na 、 S 、 Cl 和 SO_4 等离子含量迅速增加了 12%~19%,但 Na/Ca 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 含量急剧减少^[8]。这种现象的产生有其科学依据,在地震孕育过程中地壳产生形变,在断层或构造运动剧烈地区,可能迫使不同化学成分流体运移或形成相应水文和地球化学的变化。深层地下水流向浅层孔隙中的流量增加,基岩裂隙含水层挤压出更多水量或进一步加大透水性。由于地质构造作用,不同含水层间的不透水层出现断裂裂隙而发生混合;岩石-水相互作用增加。因此,地震造成的水体自然化学性质变化具有一定的普遍性,但是否因此会导致水环境恶化,尚无科学依据。

“5.12”汶川大地震重灾区的龙门山一带,构造断裂带和极度发育的构造裂隙与岩层节理等,提供了良好的地下水与岩石的相互作用条件,水分垂直渗透和沿构造裂隙的水分运移强烈,水体对周围岩石的淋滤作用较强;同时,在本次特大强度地质构造作用下,不同水环境特性的水体(主要是不同水化学类型和水化学环境的地下水)相互混合和渗透的几率增加,因此,水化学特性变化以及原生环境的水环境变化是可能存在的。另外,对于本区域而言,大

规模损毁的村镇建筑物和大量人畜遗体等污染物在较大降水淋漓下进入水体,大规模消毒杀菌药剂的残留物等,对水环境均存在潜在的改变其质量的可能。再者,大规模山体滑坡和岩土崩塌以及众多河道堰塞湖等,加之地震后可能进一步加剧的流域土壤侵蚀和泥石流,对水环境状况的影响将是十分显著的;同时,还应该注意,本区域分布广泛的森林土壤,自身含有较高的碳和氮,而土壤温度和水分的变化,极易引起土壤碳和氮的矿化速率,加上地震作用导致的土壤渗透速率增加,也将构成水环境变化的重要因素。因此,特大地震灾区影响水环境的因素较多,有些影响是短时间的,有些作用则可能是持久性的,如何系统监测区域水环境质量变化和开展全面的水环境影响评价,对于区域恢复和重建工作十分重要。

水环境变化最直接的影响就是对饮用水源和流域水利工程构成威胁。由于强大地震的破坏,原有的水资源和水环境系统的认识可能不再适用,建议在开展区域性水环境调查和成因机制分析基础上,选择典型村镇和小流域,观测分析污染物随水循环的迁移转化过程和污染物沉降与自然消解速率,并对比分析不同破坏地表岩土结构对污染物迁移变化的影响;利用地下水补给、径流与排泄等运动过程的系统监测,分析污染物对地下水系统的可能影响;通过在流域内设置不同断面水环境观测断面,在流域尺度分析水体污染物负荷动态变化;建立局地 and 流域两种尺度水质和水环境综合模拟模型,预测分析未来不同时期和不同气候情景下研究区域水环境变化趋势及其对供水系统的潜在影响

5 流域水安全与水库生态调度问题

由于水化学场变化、灾后次生污染物释放、堰塞湖、滑坡、泥石流和水土流失等诸多因素的共同影响,灾区流域尺度的水安全问题将是一个长期需要关注的问题。同时,由于地质构造运动产生的岩体破坏和断裂带含水层的水力侵蚀与岩溶发育过程的不确定性,降水-地下水-地表水间的水力联系以及地下水系统的动态变化趋于复杂和易变。区域内多数水库不同程度受损,有些水库甚至处于高危状态,流域水库群安全调度存在很大隐患。这些问题使本区域水安全问题更具有复杂性和不确定性。从这个角度出发,需要建立集监测、预报和预警一起的

综合水环境控制和管理系统,充分利用遥感数据和GIS技术手段,对流域内滑坡、岩土崩塌和堰塞湖形成与分布等实时监控,设立水质、水环境和泥石流等方面的重点观测网络,将流域尺度的水质和水环境综合模拟模型与泥石流预报模型、土壤侵蚀模型相耦合,实现流域水安全保障的综合预测和预警。

水库生态调度可以实现流域水环境的有效调控、减缓甚至消除流域下游水环境安全隐患,是现阶段国内外河流水环境管理的主要手段。其基本思路在于从流域整体出发,通过将河流水质运移和传输过程、水库水质和泥沙运移和传输过程、流域水库梯级调度与天然河流径流的河网汇流过程进行紧密结合,通过合理的水库群联合生态调度,使得流域内水沙平衡、水质平衡和水污染负荷配比等控制在一个最佳状态,最大程度提高下游水环境安全。实现流域尺度水库群联合的生态调度,需要在流域水文过程变化的准确把握以及流域水质和水环境动态变化模拟与实时监测的基础上,结合震区主要水库受损评估和灾后运行状况的评估结果,分析流域水环境和水文过程变化对水库稳定与安全运行的影响,开展主要水库稳定性和运行安全与可靠性评价;在流域河网汇流准确模拟基础上,把堰塞湖群以一种水库形态并入河流汇流过程和水量和水质调度模型中,探索保障流域下游水环境安全和水库群稳定与安全运行的水资源利用模式。

6 结束语

在过去几十年来,人们在与地震灾害抗争过程中,为了能够进行有效的减少地震灾害产生的水文和水环境不良影响,在世界范围内开展了一些针对性的研究,然而,迄今为止,这方面的相关信息积累较少,尽管地震对区域水文过程和水环境的影响较大且是一个普遍性的问题,但多数研究结果仍然是一些非理论性的观测结果。这对特大地震灾区的恢复重建工作带来诸多困难,毕竟水是经济社会和生态环境中最为活跃的因素。“5.12”汶川特大地震对于我国乃至世界范围来讲,其影响都是巨大的,而且对于四川西北山前地带的的影响可能是极其深远的。面对这种人类历史上特大自然灾害,恢复重建中需要思考的问题很多,从区域或流域尺度,既要寻求震后短期的应急水源、河道疏通和水环境问题,也需要认真思考这次特大地震对区域水文循环和水资

源的影响,同时需要考虑对区域水环境较长时期的可能影响。对这些影响的科学认知,对于灾区恢复重建过程中水文预报和水资源合理利用具有重要意义。从次生地质灾害防治角度,辨识灾后水文循环和水动力要素的变化,对于泥石流和滑坡等的预测和防治都具有重要作用。从学科发展自身来看,灾害水文学是以水文灾害为主,没有包括由水文循环和水动力因素引发的次生地质灾害,更没有在诸如地震等地质灾害后的水文系统响应角度,发展学科理论和方法。因此,开展地震灾后区域或流域水循环与水资源和水环境科学的系统研究,应该在灾后重建过程中得到重视。

参考文献 (References)

- [1] Jia Dong, Chen Xinzhu, Jia Chengzao, *et al*. Structural features of the Longmen Shan fold and thrust belt and development of the western Sichuan foreland basin, Central China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(3): 402~409 [贾东, 陈竹新, 贾承造, 等. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育 [J]. 高校地质学报, 2003, 9(3): 402~409.]
- [2] Shi Minglin, You Baoshan. Impact assessment of Chi-Chi (Taiwan) earthquake to flow duration curve in Zhuoshui Stream [A]. In: *Proceedings of the 12th hydraulic engineering Symposium in Taiwan* [C]. Tainan: 2001: 9~16 [施明伦, 游保杉. 集集地震对浊水溪流域流量历时曲线之影响评估 [A]. 见: 台湾第 12 届水利工
- 程研讨会论文集 [C]. 台南: 2001: 9~16]
- [3] Lin Guofeng, Wang Junming. Research on effects of Chi-Chi (Taiwan) earthquake to rain-runoff process in Wuxi basin [A]. In: *Proceedings of the 13th hydraulic engineering Symposium in Taiwan* [C]. Tainan: 2002: 8~14 [林国峰, 王俊明. 集集地震对乌溪流域降雨-径流过程影响之研究 [A]. 见: 台湾第十三届水利工程研讨会论文集 [C]. 台南: 2002: 8~14]
- [4] Montgomery D. R., Michael Manga. Stream flow and water well responses to earthquakes [J]. *Science*, 2003, 300 (5628): 2047~2049
- [5] Lee M., Liu TK, Ma KF, Chang YM. Coseismic hydrological changes associated with dislocation of the September 21, 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29: 1824
- [6] Chi-yuen Wang, Chung-Ho Wang, Michael Manga. Coseismic release of water from mountains: Evidence from the 1999 (Mw = 7.5) Chi-Chi earthquake, Taiwan [J]. *Geology*, 2004, 32(9): 769~772
- [7] Tsunogai U. and Wakita H. Precursory chemical changes in groundwater, Kobe earthquake, Japan [J]. *Science*, 1995, 269: 61~63
- [8] Claesson L., Skelton A., Graham C., *et al*. Hydrogeochemical changes before and after a major earthquake [J]. *Geology*, 2004, 32: 641~644
- [9] Chung Pin Liu, Bor Han Sheu. Effects of the 921 earthquake on the water quality in the upper stream at the Guandaoshi experimental forest [J]. *Water Air Soil Pollution*, 2007, 179: 19~27

Some Thoughts on Hydrology and Water Environment Problems in Reconstruction in Earthquake-hit Areas

WANG Genxu, CHENG Genwei

(1 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China)

Abstract Based on international research results of hydrological process and water environment change in large earthquake-hit areas and water circulating system characteristics in The Longmenshan Fault Zone, potential influences of 5.12 heaviest Wenchuan Earthquake to regional water circulation and water resources and water environment were discussed in the aspects of surface water circulation change and its effect on regional water resources formation and distribution, channel morphology and runoff process change, potential change of dynamic field and its effect on geotechnical stability and soil erosion, and potential change of water circulation and regional water security and reservoir ecological scheduling. It indicated that great attention should be paid to the system research of water circulation in basin scale and water resources and environment science in the process of recovery and reconstruction after disaster.

Key words earthquake-hit areas; water circulation process; water environment; regional water security