•研究论文•

DOI:10.15961/j.jsuese.201800351

强震受损山前河流河床演变研究

聂锐华[1,2], 王小凡[1,2], 刘发明[3], 王　强[1,2], 范念念[1,2*], 刘兴年[1,2]

(1.四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2.四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065;
3.中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘　要:川江流域历史地震是影响川江流域沙量与河床演变的主要动力因素之一, 汶川地震是龙门山断裂带有历史文献记录以来发生的最大地震灾害。通过历史资料收集、野外调查与理论分析相结合, 探讨了汶川地震后多种自然因素与人类活动对龙门山山前河流演变的影响, 揭示了强震受损山前河流河床演变规律, 提出了变化环境下的山前河流河床演变模式及其预测方法。结果表明: 汶川地震后龙门山山前河流均发生了不同程度的下切, 尤以石亭江为甚, 2015年汛后在105省道处最大下切深度达到27.0 m; 震后山前河流剧烈下切的影响因素众多, 且各种影响因素相互影响、相互混掺, "来水来沙条件突变、比降不和谐"是主要内因, "工程阻隔、无序采砂"是主要外因; 基于"河流临界起动假说河相关系"建立的变化环境下山前河流河床演变模式及其预测方法适用性较好, 可供类似强震受损山前河流参考。

关键词:汶川地震; 山前河流; 演变模式; 水沙条件; 比降不和谐

中图分类号:TV147　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:2096-3246(2018)03-0105-07

Study on Fluvial Processes of Piedmont Rivers Damaged by Strong Earthquakes

NIE Ruihua[1,2], *WANG Xiaofan*[1,2], *LIU Faming*[3], *WANG Qiang*[1,2], *FAN Niannian*[1,2*], *LIU Xingnian*[1,2]

(1.State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China; 2.College of Water Resource and Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China; 3.China Railway Eryuan Eng. Group Co. Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The historical earthquakes in Chuanjiang catchment were one of main dynamic factors which affect the local sediment yield and fluvial processes. The Wenchuan earthquake is the largest earthquake in the recorded history of the Longmenshan fault. Through historical data collection, field study and theoretical analysis, the effects of various natural factors and human activities on the fluvial processes of the piedmont rivers in Longmen Mountains are explored, and the evolution rules of piedmont rivers damaged by strong earthquakes are revealed, and the piedmont river evolution model and its prediction under the changing environment are proposed. The results show that: after the earthquake, different levels of evolutions of piedmont rivers have taken place in the Longmen Mountains, especially in the Shiting River, with the maximum downcutting depth of 27.0 m at the 105 Provincial Highway after the flood season of 2015; there are many factors affecting the dramatic evolution of piedmont rivers in Longmen Mountains after the earthquake and those factors are mixed and interacted with each other. While "water and sediment supply mutation and dissonance slope" are the main internal causes, "engineering barriers and disorder sand mining" are the main external causes. The piedmont river evolution model and its prediction established by the "hydraulic geometry based on the river critical initiation hypothesis" have good applicability and can be used as reference for analyzing the similar strong earthquake-damaged piedmont rivers.

Key words: Wenchuan earthquake;piedmont rivers;processes pattern;runoff-sediment condition;dissonance slope

川江流域历史地震是影响川江流域沙量与河床演变的主要动力因素之一[1]。"5·12"汶川大地震是龙门山断裂带有历史文献记录以来发生的最大地震灾害, 地震直接导致了数万个崩塌滑坡, 总体积达

收稿日期:2018 – 03 – 28

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402302); 国家自然科学基金资助项目(51779163; 51509172)

作者简介:聂锐华(1978—), 男, 教授, 博士.研究方向: 水力学及河流动力学. E-mail: scunie@163.com

* 通信联系人 E-mail: fannian7172@126.com

网络出版时间:2018 – 05 – 06 00 : 04 : 29　　**网络出版地址**: http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180506.0004.002.html

2.8×10^9 m^3[2–3]。这些松散堆积物一方面导致了后续滑坡、山洪泥石流灾害频发，另一方面降雨会致其进入河道，从而导致震区河流冲淤特性、水沙输运、泥沙通量等发生改变[4–5]。研究如此强烈的地震下的河流地貌过程具有重要的科研和工程意义。

地震前，作者对相关区域进行了野外调查，而从2008年5月至今，更对该区域进行了超过50次有针对性的野外调查。结果显示，地震后所有河流在出山口以上均出现了一定程度的淤积抬高，这与以往其他学者的研究结果是一致的[6–8]，而出山口以下往往出现冲刷下切，尤以石亭江为甚[9]。虽然山区河流总的发展趋势是以侵蚀下切为主，但一般除局部地段以外，与平原河流相比河床变形幅度要小得多，变形速度也要慢得多[10]。针对类似汶川地震后石亭江山前段这样的快速急剧下切研究的文献报道较少[11]，故其影响因素、演变机理及其预测方法非常值得研究。作者以石亭江出山口以下河段为例，采用历史资料收集、野外调查与理论分析相结合的方法，揭示强震受损山前河流的河床演变规律，提出变化环境下的山前河流河床演变模式，并建立预测方法。

1 震后石亭江山前河段演变概况

石亭江发源于龙门山，流向成都平原。石亭江长约120 km，流域面积2 879 km^2，其中，山区河道长约60 km，断面形态呈“V”型，出山口为高景关，该处有水文站，控制流域面积701 km^2，控制上游干流河长52.7 km。山前平原区河道长约60 km，断面呈“U”型或梯形复式河槽。山区和平原段的平均比降分别为44‰和3.6‰。石亭江流量随季节变化较大，洪枯流量悬殊，年均流量约11.73 m^3/s，最小流量约2.45～3.00 m^3/s，最大流量约1 800～2 200 m^3/s，相差近千倍，2年一遇、10年一遇和30年一遇的洪峰流量分别为600、2 095和2 935m^3/s。石亭江干流河床被深厚的沙卵石层覆盖，即便急剧下切后也没有基岩出露。从出山口到河口，河床沙卵石中值粒径从50 mm减小到15 mm。石亭江与湔江汇合后，再与绵远河汇合为长江的一级支流沱江，如图1所示。

石亭江上游山区为四川著名的鹿头山暴雨区，2008年“5·12”汶川大地震以后，石亭江相继发生了2010年“8·9”洪水（740 m^3/s）、2011年“7·4”洪水（1 300 m^3/s）、2012年“8·18”洪水（1 510 m^3/s）和2013年“7·9”特大洪水（2 710 m^3/s），洪水呈历年增大趋势。历经多年洪水后，石亭江山前河段普遍产生剧烈演变，下切严重。2015年7月，对石亭江出山口以下河段详细勘测结果如图2所示。

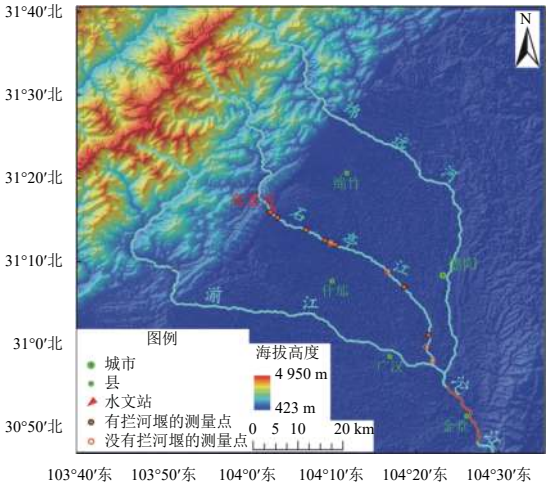


图 1 研究河流区位图

Fig. 1 Location map of the studied rivers

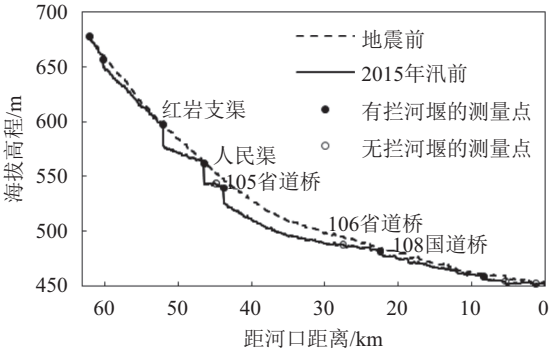


图 2 石亭江下切纵剖面图（2015年7月）

Fig. 2 Longitudinal downcutting of the Shiting River (July 2015)

从实际勘测结果来看，下切深度从出山口到105省道大桥处逐渐增加，而后逐渐减少，下切总量超1.0×10^8 m^3[9]。河床演变最剧烈段为双盛段，最大下切深度发生在105省道石亭江大桥处，达20.8 m，2015年汛后这一数据更增大到27.0 m左右。由于部分位置很难确定地震前河床高程，故下切深度根据人工建筑物确定。例如，桥梁所在断面的下切深度，以桥梁最原始抗滑桩的中间部分到现河床之间的距离为准。

石亭江双盛段涉河建筑物较多且分布密集，从上游向下游依次主要包括人民渠穿石亭江涵洞工程、成兰铁路石亭江大桥、成绵复线高速公路石亭江大桥、105省道石亭江大桥等，上述4个涉河建筑物间距分别为1.10、0.06与1.40 km。下面分别介绍其中3个建筑物地震后演变情况。

1）人民渠穿石亭江涵洞工程

人民渠穿石亭江涵洞位于四川省什邡市双盛镇与新市镇交界的石亭江干流，距渠首56.61 km，始建于1956年，经过若干次扩建与改建，形成了5个涵洞

群，单洞最大过流量为18 m^3/s，整体最大设计流量为81 m^3/s。该涵洞为向下游灌区输水的控制性工程，担负着灌溉下游农田面积308.75万亩及下游100万人生活用水等作用。工程河段原河道比降为5.4‰左右，河道河床基本与涵洞顶部齐平，2008—2013年几次相对较大的洪水均造成了该河段河床剧烈变迁与严重下切，涵洞上下游高差达20 m以上，2013年汛后实测涵洞处河床上、下游高差为20.29 m，严重威胁着人民渠穿石亭江涵洞工程的安全，如图3(a)、(b)所示。在历年洪灾过程中，经过应急抢险和灾后恢复，最终形成了以底流消能防冲措施为主，辅以局部护岸与河床平整的方案，一直沿用至今，如图3(c)～(f)所示。

(a) 2011年破坏　(b) 2013年破坏

(c) 2011年修复　(d) 2012年修复

(e) 2013年修复　(f) 2014年修复至今

图 3　人民渠穿石亭江涵洞工程历年洪灾水毁形态及灾后修复情况

Fig. 3　Damage patterns and post-disaster repairs of culvert of Renmin Channel to Shitingjiang River over the years

2)成绵复线高速公路石亭江大桥

成绵复线高速公路石亭江大桥于2011年建成，历经2009—2012年洪水后，成绵复线高速公路大桥处河床相应下切，至2012年8月，下切深度约3～5 m(图4(a))，汛后采用了钢筋石笼和大块石进行防护。2013年“7·9”洪水后，该段河床整体下切加剧，其中，成绵复线高速公路石亭江大桥桩基裸露高度约8～10 m(图4(b))，位于墩前的石笼防护带被冲毁。2013年汛后，对成绵复线石亭江大桥桥墩进行了加固防护以保证桥墩整体稳定性，主要的工程措施为加设抗冲承台(图4(c))。2014年汛后，对成绵复线石亭江大桥后约50 m河段进行了混凝土护底防护，大桥断面在2015年与2016年总体变化不大。2017年汛期，随着下游105省道石亭江大桥处硬化防护措施被冲毁，成绵复线高速公路石亭江大桥下混凝土护底部分破坏，大桥主槽桩基再次裸露(图4(d))。

(a) 2012年8月　(b) 2013年8月

(c) 2014年10月　(d) 2017年10月

图 4　成绵复线高速公路石亭江大桥历年冲刷破坏情况

Fig. 4　Scouring failure of Shitingjiang River Bridge of the Secondary Highway from Chengdu to Mianyang over the years

3)105省道石亭江大桥

105省道石亭江大桥在“5·12”地震后加固维修，2009年10月竣工。2012年汛期，洪水导致了该桥桩基破坏(图5(a))，汛后对该桥局部河道进行了硬化处理，并对桥墩实施了加粗、加固处理，以确保桥墩处河道不会继续下切与增加桥的稳定性。硬化后河床形成稳定的河道侵蚀基准面，高程约为539.0 m，硬化段下游设消力池与下游河道衔接，消力池底高程536.0 m。2013年汛期，随着消力池下游河床冲刷下切，消力池底部齿墙被淘刷而坍塌破坏(图5(b))，下游河床相对该消力池底板的下切深度约为9.0 m，至2015年汛后，这一数据增大到15.0 m左右(图5(c))，

(a) 2012年8月　(b) 2013年8月

(c) 2015年11月　(d) 2017年10月

图 5　105省道石亭江大桥历年冲刷破坏情况

Fig. 5　Scouring failure of Shitingjiang River Bridge of 105 Provincial Highway over the years

即河段下切深度达到27.0 m左右。2017年汛期，洪水冲毁桥下硬化防护措施，导致4个桥墩桩基严重受损（图5(d)）。

2 石亭江山前河段剧烈演变影响因素分析

石亭江山前河段在2009—2013年（5 a）内发生了剧烈变化，通过查阅历史资料，结合大量野外实地考察，分析认为引发石亭江山前河段河道连续性中断、岸坡坍塌、涉河建筑物稳定性降低等问题不是某单方面影响因素造成的，而是各种影响因素相互作用、相互混掺的结果。自然影响因素主要包括暴雨洪水、来沙突变、河床地质地貌条件以及比降变化等，人类活动影响因素主要包括无序采砂与工程阻隔等。

1）来水来沙条件突变，无序采砂，河床抗冲保护层破坏。研究河段位于龙门山山前区冲积扇范围，经过长期的地质年代，河流动力与河床形成了相对稳定的冲淤平衡态，河床粗化表层能保护下部细砾及砂砾石地层，在河道水流与河床边界条件不发生急剧改变的条件下，该冲淤平衡形态始终保持稳定。然而，“5·12”地震后，地震给上游山区河段带来大量松散堆积物，加上暴雨山洪频发，河道泥沙通量大幅增加，上游山区河道淤积抬升导致山前区河道河床比降增大。上述因素联合作用，山前区河流水流流速增加，原本相对稳定的河床抗冲保护层无法适应变化后的水流条件而发生破坏，最终导致河床下切[11−15]。另一方面，“5·12”地震后，灾后重建需要大量砂石，因此河流的采砂量比地震前大幅增加。当出现无节制、无序开采之后，河床内会形成许多大坑、深槽，既破坏了原河床抗冲保护层，又破坏了原河床形态，从而加剧河道演变尤其是河道下切。

2）来沙细化，加剧河床演变。“5·12”地震后，地震给上游山区河段带来大量松散堆积物，而这些堆积物粒径分布范围广，由于分选作用[16]，较快输送到下游的大多是细颗粒，而对河床稳定起主导作用的较粗颗粒输运较慢，并且，受河段工程阻隔作用很难输运到下游河段，尤其是在河道采砂情况下。来沙细化会增大水流挟沙能力，增强床面泥沙活动性[17−20]。小于0.1 mm的黏性颗粒会对水流粘性产生较显著的影响，降低粗颗粒的沉降速度，使得水流具有较大的挟沙能力；同时，大量细沙补给，河床变得更加平滑，河床的活动性增强。

3）河床下切，滩槽格局变化，加剧河床演变。河床冲刷下切会导致漫滩水流归槽，进一步增加主槽单宽流量，这时来沙补给和河床地质地貌条件对限制河床进一步下切而言变得尤其重要[21−22]。而石亭江山前河段在上述两方面恰恰均大为不足。一方面，受工程阻隔及无序采砂影响，对河床稳定起决定作用的较粗颗粒泥沙补给减少甚至没有；另一方面，河床抗冲保护层下部细砾及砂砾石地层分布较均匀，在冲刷分选过程中对河床稳定起决定作用的较粗颗粒含量较低。因此，河床在冲刷下切后，漫滩水流向主河槽集中，导致主河槽河床持续失稳并急剧冲刷下切，直至河床比降变缓，下切方可能终止。

4）河床组成与河床比降不和谐，加剧河床演变。石亭江山区和平原段的平均比降分别为44‰和3.6‰，出山口10 km河段河床比降为7‰～8‰，双盛段比降为5.4‰，湔江汇口上游20 km河段比降为1‰～1.7‰。总体来说，沿程比降变化较大，尤其在双盛段河床比降变化明显。通过调查石亭江山前河段沿程河床组成发现，地震前石亭江双盛段床沙d_{90}约为0.15 m，明显与该河段河床比降5.4‰不和谐，在地震后双盛段床沙d_{90}更是降为0.11 m。同时，部分研究还表明，颗粒临界起动切应力随坡度的增大而增大[23]。石亭江下游平原河段的平均坡度仅为3.6‰，而上游山区河段的平均坡度超过平原的10倍。

5）工程阻隔，加剧河床演变。“5·12”地震后，石亭江山前河流涉河建筑物增多导致了河床局部冲淤特性发生改变。以双盛段为例，“5·12”地震后，该河段改建或新建的建筑物主要包括：人民渠穿石亭江涵洞工程河床局部硬化（宽度约32 m），成兰铁路石亭江大桥、成绵复线高速公路石亭江大桥及105省道石亭江大桥段河床硬化。其中，河床硬化截断了河道的连续性，在硬化段下游与河床软硬交界处，水流容易下潜形成冲刷坑，并且，冲刷程度随下游河床下切而加剧，形成断崖式下切。成兰铁路桥与成绵复线桥二者间距仅60 m左右，且二者跨度不相同，桥墩对河道水流的连续扰动，会导致河道水流紊流程度增加，从而加剧局部河床冲刷和下切。

3 变化环境下的山前河流河床演变模式及其预测方法

河床演变是水流与河床相互作用的结果。水流与河床构成一个矛盾的统一体。水流作用于河床，使河床发生变化，河床的变化又反过来影响水流的结构，二者相互依存、相互影响、相互制约，永远处于变化和发展的过程中。水流与河床的相互作用是通过泥沙运动来实现的。影响河床演变的因素主要分为自然因素和人类活动。自然因素主要包括来水来沙条件、河床组成及河岸特性，人类活动主要包括工程建设、水土保持、河道采砂等，而且各种影响因素相互混掺、相互作用。

山前河流是指河流流出出山口进入平原或沼泽、湖泊等之前的过渡河段。本节主要研究变化环境下的山前河流演变模式及预测计算方法。变化环境是指影响河流演变的自然因素改变或河流受人类活动干扰。冲积河流通过自动调整作用，在水流与河床长期互相作用下，河床将形成与水力条件相适应的水深、河宽、比降等几何形态。这种几何形态与水力和泥沙因素之间的定量关系称为河相关系。河相关系可以反映河流的稳定程度，包括河床的纵向稳定和横向稳定。河床的纵向稳定决定于水流对河床泥沙的作用情况，河床的横向稳定决定于滩槽特性。山前河流的纵剖面一般为下凹型，主要是由于大多数山前河流从上到下水量逐渐增大，含沙量逐渐减小，床沙越来越细导致的。当然，在特定的条件下，山前河流纵剖面也可以是上凸式或直线式。

一直以来，对冲积性河流河相关系的研究比较多，研究的方法思路也不尽相同，因此出现了同一条河流、甚至一条河流中的一段都有若干种河相关系式。目前，研究河相关系的方法主要有4种，包括水力几何形态法、量纲分析法、最小极值假说法以及稳定性理论分析法。作者选用针对河床边界由卵石组成的山区河流提出的临界起动假说确定山前河流适用的河相关系式。河流的临界起动假说包括两个基本假定：一是，在造床流量下，河床边界上各点的泥沙均处于临界起动状态；二是，床面粗颗粒的大小在短河段内沿程变化较小。根据该假说，作者在水流连续方程与运动方程的基础上，添加了泥沙临界起动流速，同时，引入阿尔图宁的断面宽深比关系式，通过4个方程联立求解得到基于临界起动假说的山前河流河相关系式。4个方程表达式如下。

水流连续方程为：

$$Q = BhU \tag{1}$$

式中，Q为来流量，B为河槽宽度，h为河槽平均水深，U为断面平均流速。

水流运动方程为：

$$U = \frac{1}{n}h^{2/3}I^{1/2} \tag{2}$$

式中，n为曼宁糙率系数，I为河流的比降。

临界起动流速公式为：

$$U = Kd^{1/3}h^{1/6} \tag{3}$$

式中，K为待定系数，d为床沙粒径。

阿尔图宁关系式：

$$\frac{B^j}{h} = \eta \tag{4}$$

式中，j、η为待定系数。

联合式(1)～(4)可以得到河流的比降、河槽宽度与水深分别为：

$$I = K^{\frac{20j+12}{7j+6}} n^2 \eta^{\frac{6}{7j+6}} Q^{\frac{-6j}{7j+6}} d^{\frac{20j+12}{21j+18}} \tag{5}$$

$$B = K^{\frac{-6}{7j+6}} \eta^{\frac{7}{7j+6}} Q^{\frac{6}{7j+6}} d^{\frac{-2}{7j+6}} \tag{6}$$

$$h = K^{\frac{-6j}{7j+6}} \eta^{\frac{-6}{7j+6}} Q^{\frac{6j}{7j+6}} d^{\frac{-2j}{7j+6}} \tag{7}$$

河相关系分析的复杂之处在于式(5)中来流量Q、曼宁糙率系数n、河段冲淤平衡后床沙代表粒径d，以及几个待定系数的取值均存在一定不确定性与难度，下面分别阐述。

来流量Q具体采用造床流量计算得到。造床流量是指在一段时间内，其造床作用与该时段流量过程的造床作用相当的某个流量。它既不等于时段内最大流量，因为这样流量的造床作用太大；也不等于最小流量，因为这样流量的造床作用太小；也不是平均流量，因为平均流量的造床作用通常小于同时段内流量过程的造床作用；它是比平均流量大的某个流量。确定造床流量一般可采用马卡维耶夫方法、韩其为方法、平滩水位法及频率分析法[10]。此处，建议在山前河流河相关系分析中造床流量可取频率为2～5 a的洪水流量。曼宁糙率系数n一般可采用原河床糙率系数。河段冲淤平衡后床沙代表粒径d与床沙条件及上游来沙条件有关。在冲淤平衡河段一般选取河段床沙的平均粒径d_m；在明显冲刷河段，可采用何文社粗化层级配计算方法得到粗化层级配的d_m[24]，亦可直接选取现河段床沙的代表粒径d_{90}。

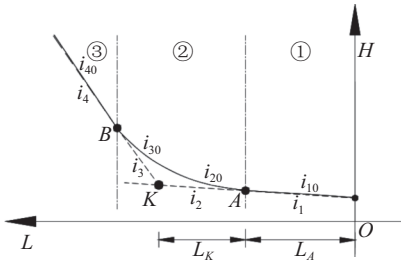
待定系数K表征相同水力条件下泥沙起动颗粒的大小程度。聂锐华等[25]将国内外现有的几十种泥沙起动条件进行了转换与统一，得到各种起动条件的待定系数K值一般界于3.37～7.86之间；卵石野外水槽试验资料验证表明，K大约取值4.60时，与实测资料符合较好。待定系数j、η表征河流宽深比，受河段所处位置决定。阿尔图宁[10]建议在山区河段η取值10～16，山麓河段η取值9～10，中游河段η取值5～9；在山区与山麓河段j取值0.8～1.0，中游河段j取值0.5～0.8。

在基于临界起动假说的山前河流河相关系研究基础上，作者提出了变化环境下的山前河流河床演变模式及其预测方法，可供类似山前河流参考。具体预测方法为：

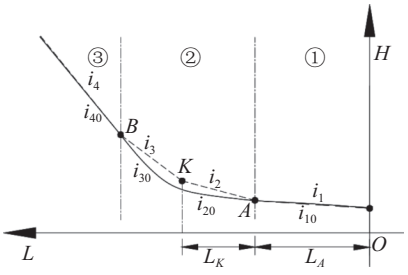
1)对山前河流进行长河段纵断面实测，得到不同河段纵比降I_{i0}，点汇山前河流长河段实测纵比降图，如图6实线所示。

2)采用式(5)计算造床流量下不同河段平衡比降I_i，并结合长河段历史演变及现场调查结果，适当

修正j、η的取值，得到山前河流长河段计算纵比降图，如图6虚线所示。



(a) 可能下切型河流



(b) 可能淤积型河流

图 6 变化环境下的山前河流河床演变预测方法

Fig. 6 Riverbed evolution prediction method for piedmont river under changing environment

3）对比不同河段实测比降I_{i0}与式（5）计算河段平衡比降I_i的相关关系。

4）若河段实测值I_{i0}与计算值I_i沿程均相当，则表示该段较稳定，如图6所示的①区与③区；若河段实测值较计算值偏差较大，则表示该段河流较不稳定，如图6所示的②区。

5）若出现河段实测值I_{i0}较计算值I_i大或河段上段实测值I_{i0}较计算值I_i小、下段实测值I_{i0}较计算值I_i大的情况，则河段可能冲刷下切，如图6（a）所示，属于可能下切型河流；若出现河段实测值I_{i0}较计算值I_i小或河段上段实测值I_{i0}较计算值I_i大、下段实测值I_{i0}较计算值I_i小的情况，则河段可能淤积抬高，如图6（b）所示，属于可能淤积型河流。

需要强调的是，上述变化环境下的山前河流河床演变预测方法主要适用于河床有深厚覆盖层的山前河流。当局部河段有自然或稳定的人工侵蚀基准时，需将长河段的下游起始点移到该侵蚀基准处，并仔细分析侵蚀基准面对局部河段河床演变的影响。

作者利用实测资料，采用上述预测和计算方法对石亭江山前河段的稳定性进行了分析计算：

1）当出山口10 km河段造床流量Q为1 000 m^3/s、河床d_{90}为0.3～0.4 m时，计算得到河床比降为7‰～8‰，与实测值相当。

2）当湔江汇口上游20 km河段造床流量Q为1 000m^3/s、河床d_{90}为0.05～0.08 m时，计算得到河床比降为1‰～1.7‰，亦与实测值相当。

3）当人民渠穿石亭江涵洞工程下游5 km河段造床流量Q为1 000m^3/s、河床d_{90}取0.15 m时，计算得到河床比降为3.3‰，较2008年以前该河段实测值5.4‰低；即使河床d_{90}取0.20 m时，计算得到河床比降为4.6‰，仍较2008年以前该河段实测值5.4‰低。

4）实际情况是，近年来在来水来沙条件改变、工程阻隔、河道采砂等多因素影响下，人民渠穿石亭江涵洞工程下游5 km河段河床d_{90}仅为0.11 m，计算得到河床比降为2.36‰，大大低于2008年以前该河段实测值5.4‰。

通过上述计算表明，人民渠穿石亭江涵洞工程下游5 km河段属于典型的河段实测比降I_{i0}较计算值I_i大的情况，甚至存在河段上段实测比降I_{i0}较计算值I_i小、下段实测比降I_{i0}较计算值I_i大的情况，符合可能下切型河流特征。即在变化环境下（自然条件改变或人类活动干扰）该河段会发生河床下切，甚至剧烈下切，与实际相符。

4 结 论

强震受损河流流域坡面侵蚀条件和河流泥沙来源变异、河道比降改变、工程阻隔、人类活动干扰等改变了河流系统的内外部条件，破坏了河流自身原有的相对平衡状态，诱发了一系列水安全问题。以石亭江为例，作者阐明了自然因素与人类活动干扰对震后山前河流剧烈演变的影响，尤其是来沙突变、河床比降变化、工程阻隔及无序采砂的作用；揭示了山前河流剧烈演变内因“来水来沙条件突变、比降不和谐”与外因“工程阻隔、无序采砂”的耦合机制；建立了基于河流临界起动假说的河相关系，提出了变化环境下的山前河流河床演变模式及其预测方法，可供类似河流参考。强震受损河流泥沙分布规律及补给变异特性，强震受损河流水沙运动、河道演变模式与驱动机制，以及远离平衡态河流河床演变理论是未来需关注的重点。

参考文献：

[1] Cao Shuyou,Liu Xingnian,Huang Er,et al.Advances in studies of river sediment and fluvial processes of the upper-Yangtze river in earthquake background[J].Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition),2009,41(3):26–34.[曹叔尤,刘兴年,黄尔,等.地震背景下的川江流域泥沙与河床演变问题研究进展[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(3):26–34.]

[2] Huang Runqiu,Fan Xuanmei.The landslide story[J].Nature Geoscience,2013,6:325–326.

[3] Li Gen,West A J,Densmore A L,et al.Seismic mountain building:Landslides associated with the 2008 Wenchuan

earthquake in the context of a generalized model for earthquake volume balance[J].Geochemistry Geophysics Geosystems,2014,15(4):833–844.

[4] Ge Yonggang,Cui Peng,Zhang Jianqiang,et al.Catastrophic debris flows on July 10th 2013 along the Min River in areas seriously-hit by the Wenchuan Earthquake[J].Journal of Mountain Science,2015,12(1):186–206.

[5] Cook K L,Turowski J M,Hovius N.River gorge eradication by downstream sweep erosion[J].Nature Geoscience,2014,7:682–686.

[6] Ding Hairong,Li Yong,Ni Shijun,et al.Increased sediment discharge driven by heavy rainfall after Wenchuan earthquake:A case study in the upper reaches of the Min River,Sichuan,China[J].Quaternary International,2014,333:122–129.

[7] Liu Feng,Yang Shunhu.The effect of the Wenchuan earthquake on the fluvial morphology in the Longmen Shan,eastern Tibetan Plateau:Discussion and speculation[J].Quaternary International,2015,371:280–289.

[8] Wang Jin,Jin Zhangdong,Hilton R G,et al.Controls on fluvial evacuation of sediment from earthquake-triggered landslides[J].Geology,2015,43(2):115–118.

[9] Fan Niannian,Nie Ruihua,Wang Qiang,et al.Dramatic undercutting of piedmont rivers after the 2008 Wenchuan Ms 8.0 Earthquake[J].Scientific Reports,2016,6:37108.

[10] 钱宁,张仁,周志德.河床演变学[M].北京:科学出版社,1987.

[11] Cao Shuyou,Liu Xingnian.Adaptive adjustment and mutation response of river bed within changing sediment supply in Mountain River[J].Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition),2016,48(1):1–7.[曹叔尤,刘兴年.泥沙补给变化下山区河流河床适应性调整与突变响应[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(1):1–7.]

[12] Wang Tao,Liu Xingnian,Huang Er,et al.Experimental study on the critical condition of armored layer's breakage[J].Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition),2008,40(4):36–40.[王涛,刘兴年,黄尔,等.卵石河床清水冲刷粗化层破坏临界条件试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2008,40(4):36–40.]

[13] Nie Ruihua,Liu Xingnian,Yang Kejun,et al.Experimental investigation on the maximum bed-load transport rate during the process of armoring layer destruction[J].Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition),2013,45(2):1–5.[聂锐华,刘兴年,杨克君,等.粗化层破坏过程中的最大推移质输沙率试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(2):1–5.]

[14] Vericat D,Batalla R J,Garcia C.Breakup and reestablishment of the armour layer in a large gravel-bed river below dams:The lower Ebro[J].Geomorphology,2006,76(1/2):122–136.

[15] Orrú C,Blom A,Uijttewaal W S J.Armor breakup and reformation in a degradational laboratory experiment[J].Earth Surface Dynamics,2016,4:461–470.

[16] Fan Niannian,Xie Yushu,Nie Ruihua.Bed load transport for a mixture of particle sizes:Downstream sorting rather than anomalous diffusion[J].Journal of Hydrology,2017,553:26–34.

[17] Dietrich W E,Kirchner J W,Ikeda H,et al.Sediment supply and the development of the coarse surface-layer in gravel-bedded rivers[J].Nature,1989,340(6230):215–217.

[18] Venditti J G,Dietrich W E,Nelson P A,et al.Effect of sediment pulse grain size on sediment transport rates and bed mobility in gravel bed rivers[J].Journal of Geophysical Research(Earth Surface),2010,115(F3):F03039.

[19] Venditti J G,Dietrich W E,Nelson P A,et al.Mobilization of coarse surface layers in gravel-bedded rivers by finer gravel bed load[J].Water Resources Research,2010,46(7):W07506.

[20] Wang Qiang,Nie Ruihua,Yang Kejun,et al.Influence on flow resistance in armoring channel by fine gravel supply[J].Journal of Sediment Research,2017,42(2):16–20.[王强,聂锐华,杨克君,等.砂卵石河流粗化完成后细沙补给对河床阻力的影响[J].泥沙研究,2017,42(2):16–20.]

[21] Liu Chao,Wright N,Liu Xingnian,et al.An analytical model for lateral depth-averaged velocity distributions along a meander in curved compound channels[J].Advances in Water Resources,2014,74:26–43.

[22] Liu Chao,Shan Yuqi,Liu Xingnian,et al.The effect of floodplain grass on the flow characteristics of meandering compound channels[J].Journal of Hydrology,2016,542:1–17.

[23] Lamb M P,Dietrich W E,Venditti J G.Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope?[J].Journal of Geophysical Research(Earth Surface),2008:F02008.

[24] He Wenshe.Study on laws of transport for non-uniform sediment[D].Chengdu:Sichuan University,2002.[何文社.非均匀沙运动特性研究[D].成都:四川大学,2002.]

[25] Nie Ruihua,Liu Xingnian,Cao Shuyou,et al.Comparison study on incipient motion conditions for cohesionless sediment[J].Advances in Water Science,2004,15(5):584–587.[聂锐华,刘兴年,曹叔尤,等.无粘性泥沙起动条件对比研究[J].水科学进展,2004,15(5):584–587.]

（编辑　赵　婧）

引用格式：Nie Ruihua,Wang Xiaofan,Liu Faming,et al.Study on fluvial processes of piedmont rivers damaged by strong earthquakes[J].Advanced Engineering Sciences,2018,50(3):105–111.[聂锐华,王小凡,刘发明,等.强震受损山前河流河床演变研究[J].工程科学与技术,2018,50(3):105–111.]