乔建平，王萌，吴彩燕. 汶川地震扰动区小流域滑坡泥石流风险区划[J]. 灾害学，2016，31(2)：1－5. [Qiao Jianping，Wang Meng and Wu Caiyan. Landslide and Debris Flow Risk Zonation at Small Watershed Scale in Wenchuan Earthquake Disturbed Area[J]. Journal of Catastrophology，2016，31(2)：1－5.]

汶川地震扰动区小流域滑坡泥石流风险区划*

乔建平[1,2]，王 萌[1,2]，吴彩燕[3]

（1. 中国科学院地表过程与山地灾害重点实验室，四川 成都 610041；2. 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；3. 西南科技大学，四川 绵阳 621000）

摘 要：地震扰动区小流域地质灾害(滑坡、崩塌、泥石流)风险区划研究主要涉及两方面的问题：①地震扰动区小流域滑坡泥石流与一般地区的滑坡泥石流有什么差异？②这种特定环境的滑坡泥石流风险区划与一般地区风险区划有什么不同？根据这两个关键命题讨论了汶川地震灾区都江堰白沙河小流域滑坡泥石流风险区划问题，认为在地震扰动区的一个独立地貌单元小流域中，滑坡泥石流比非地震区小流域的分布数量更多，范围更广，规模更大。尤其在后期降雨条件下发生频率更高，潜在危险性更高。所以在危险度区划阶段必须结合地震因子，评价与地震动因素的相关性，突出地震动的破坏作用。易损度区划阶段应该考虑承载体的抗震因子。风险区划模型与一般地区模型基本一致，而差别在危险度区划阶段结合了地震因素的影响。

关键词：地震扰动区；小流域；地质灾害；风险；汶川地震

中图分类号：X43；P642　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000－811X(2016)02－0001－05

doi：10.3969/j.issn.1000－811X.2016.02.001

汶川 8.0 级大地震之后扰动区的地质灾害(以滑坡泥石流为主)极为活跃，灾后重建安置区受其影响的风险损失可能性加大。作者在已有的风险区划基础上[1－6]，选择地震烈度Ⅺ度区的都江堰白沙河小流域开展滑坡泥石流风险区划研究，探索地震扰动区小流域滑坡泥石流风险区划特点和方法。根据文献[1－6]中的探讨总结可知，近年来国内外开展的关于地质灾害风险研究众多，包括各种定义、各种评价模型、各种区划方法等等。但到目前为止，尚未见到有关地震扰动区小流域地质灾害风险区划的专题研究。将地震扰动区小流域视为一个有限的独立完整地貌系统，针对系统内滑坡泥石流的具体特点，建立较为系统、精细的风险研究系统模式，更有助于提高滑坡泥石流风险区划的精度。地震扰动区小流域滑坡泥石流风险区划研究的关键问题有两个：①地震扰动区小流域滑坡泥石流的发育特点是什么，与其它滑坡泥石流发育有什么不同；②地震扰动区小流域滑坡泥石流风险与其它区域滑坡泥石流风险相比有什么特点，采用风险区划方法有什么区别。本文针对这两个关键问题进行探讨，认为地震扰动区小流域的滑坡泥石流发育程度、危害程度都远远超过一般区域，并在小流域内就可以形成系统的灾害链，各类灾害转化互为一体。地震扰动区小流域的滑坡泥石流风险区划与常规方法相比，主要是在危险度区划阶段必须增加与地震相关的因子指标来评价地震动对区内滑坡泥石流破坏贡献。

1 地震扰动区和小流域的概念

1.1 地震扰动区

广义地震区可以沿地震断裂构造带分布，延伸几十至几百公里，甚至更大范围，如西南地震区、西北地震区、华北地震区等等。而狭义地震扰动区应该有明确的范围标准，特指在地震动过程中地面遭到严重破坏的区域。本文提出“地震扰动区”概念的主要目的是针对地震滑坡泥石流易发区，重点研究这些特殊范围内地震诱发滑坡泥石流的发育规律及潜在风险。虽然目前国内外没有地震扰动区明确的划分标准，但根据作者研究地震滑坡的经验[7－11]，认为可以将我国地震烈度标准作为参考。我国 1990 年修订的地震烈度表标准，Ⅸ度区内“滑坡塌方常见”。即从地震烈度的Ⅸ度区开始，山区可能出现典型的滑坡崩塌泥石流。作者对中国

* 收稿日期：2015－10－21　　修回日期：2016－01－06

基金项目：科技部重点国际合作项目(2013DFA21720)；国家青年科学基金(41301592)；中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室自主支持基金项目资助(2013 年度)；长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2015228/KY)；国家电网公司科技项目(521999150031)

作者简介：乔建平(1953－)，男，四川成都人，研究员，博士生导师，研究方向为滑坡规律、滑坡机理与滑坡危险度区划、地震滑坡. E-mail：jpqiao@imde.ac.cn

西南地区已有的大于 7 级以上的地震灾区进行了实地考查，认为Ⅸ度区以上为滑坡泥石流易发区。所以相对滑坡泥石流发育环境条件和地震动破坏动力而言，可以将地震烈度的Ⅸ度区以上区域划分为适宜滑坡泥石流发育的地震扰动区。

1.2 小流域

根据我国水利行业规定标准[12]，小流域(small watershed)指面积不超过 50 km^2 的集水单元。原则上控制在 30 ~ 50 km^2 之间，特殊情况下不宜小于 3 km^2 或大于 100 km^2，且为一个独立自然集水地貌单元。小流域由一个或多个微流域归并而成。小流域滑坡泥石流风险区划是针对这些小区域范围、独立流域地貌单元的滑坡泥石流灾害可能遭受的损失类型进行综合划分，评价不同类型区风险危害损失的程度和发生概率。

研究区位于汶川大地震的都江堰白沙河流域，属长江流域岷江水系，系岷江一级支流。流域面积 364 km^2，微流域共 16 条，其中无人区面积占 310 km^2，灾后重建的集中安置区面积仅 51.57 km^2，符合小流域的划分标准。该区位于极震区，距震中汶川映秀仅 8.6 km，地震烈度为Ⅺ度。本文重点将选择游灾后集中安置区 51.57 km^2 范围进行滑坡泥石流风险区划(图 1)。

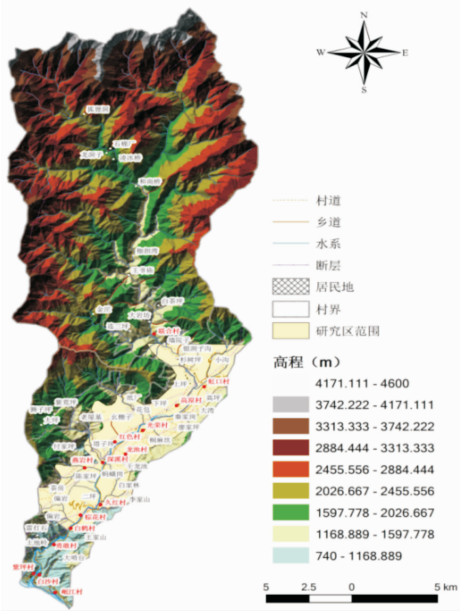


图 1 白沙河流域图

2 灾害发育特点

2.1 分布密度大

汶川大地震诱发的崩塌滑坡泥石流数量和规模远远超过一般地区。根据实地调查和遥感判译，白沙河流域的崩塌滑坡泥石流总数达到 6 119 处，分布密度达到了 16.8 处/km^2，全流域地表破坏总面积达到 39.7 km^2，占流域总面积的 10.9 %，这个比例在汶川地震灾区已属于高水平分布(表 1、图 2)[13-14]。

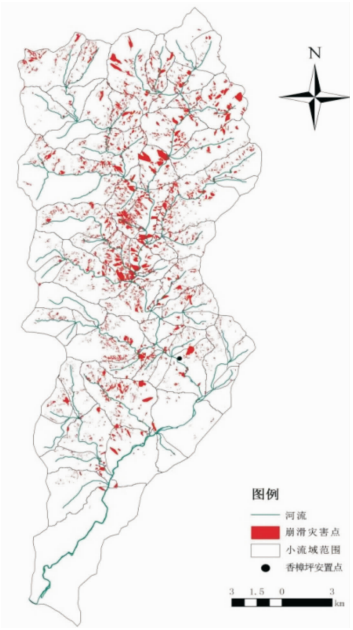


图 2 白沙河流域崩塌滑坡分布图

2.2 大型崩滑体极为发育

汶川大地震诱发了大量的地震滑坡，根据文献统计的滑坡面积大于 5×10^4 m^2 的地震滑坡排行表[15]，汶川震区共发育 112 处面积大于 5×10^4 m^2 的滑坡，其中有 9 处发育在都江堰辖区内。这 9 处滑坡中，有 8 处座落在研究区境内。

2.3 灾变程度高、危害严重

地震诱发的崩塌、滑坡、碎屑流等灾害物源极为丰富，在降雨条件下极易转化为泥石流，从而造成灾害损失加重。例如集中安置区内的深溪沟、锅圈岩滑坡、银洞子沟滑坡、干沟崩塌群等已经产生了数次泥石流，给当地居民带来了严重的危害。其中，2010 年 8 月 13 日，2013 年 7 月 9 日的两次强降雨过程促使区内泥石流群发，使安置区新建住宅、道路等遭到严重破坏，并致人员伤亡。

综上所述，与非地震区相比较，地震扰动区小流域的滑坡泥石流具有分布密度极高、大型灾害体居多、后期极易转化泥石流和危害严重的发育特点。

3 地震扰动区小流域风险区划

3.1 区划方法

地震扰动区小流域滑坡泥石流风险区划是根据地震滑坡泥石流发育特点，将精细空间化的独立自然集水地貌单元内的滑坡泥石流危险度与承灾体易损度区划结果进行综合分析，划分可能遭受危害损失的区域范围，并评价危害损失类型和发生可能性(概率)。根据地震扰动区小流域滑坡泥石流风险区划的原则，可以建立区划方法的基本结构模型(图 3)。

表 1　白沙河流域崩塌滑坡泥石流统计表

统计分类	滑坡/处	崩塌/处	泥石流/处	灾害总数/处	破坏面积/km^2	流域面积/km^2	破坏面积比例/%
总计	223	5971	199	6119	39.7	364	10.9

表 2　小流域滑坡泥石流风险区划分类表

分类	面积标准/km^2	灾害体精度	承载体统计类型	区划比例尺
Ⅰ	3～30	全部实测单体灾害的面积及危险区	单体房物结构类型及价值；农作物品种及价值；基础建设结构类型及价值	≥1：5000
Ⅱ	30～50	大于 1×10^4 m^3 规模实测单体灾害的面积及危险区	群体建筑物结构类型；农地（耕地、林地、果木等）面积及价值；基础建设类型及面积	≥1：10000
Ⅲ	50～100	大于 5×10^4 m^3 规模实测单体灾害的面积及危险区	群体建筑面积；农地（耕地、林地、果木等）面积；基础建设面积	≥1：50000

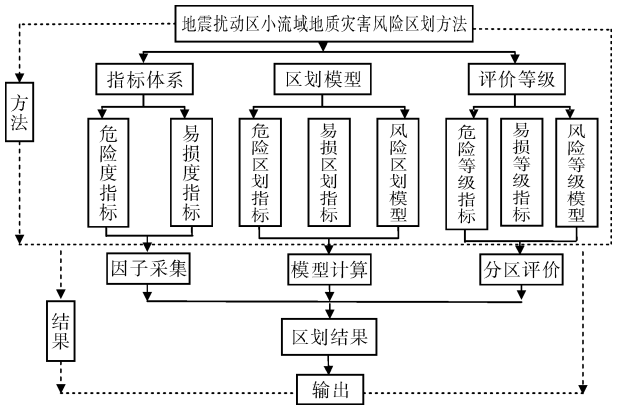


图 3　地震扰动区小流域滑坡泥石流风险区划框图

地震扰动区小流域滑坡泥石流风险区划与常规滑坡泥石流风险区划的主要区别有如下两方面。

（1）区划的精度标准更高。要求滑坡泥石流灾害的基础要素内容更全面，承载体的基本信息内容更详细，概率分析更准确。各种灾害体将以点状要素变为面状要素，能更真实地、准确地体现了滑坡泥石流在小范围空间中的影响作用，获得的风险可靠度更高。参考水利部门对小流域的划分标准，可以对滑坡泥石流风险区划空间尺度进行标准划分（表 2）。

（2）区划指标与地震因素相关。地震扰动区滑坡泥石流风险区划必须关联地震因子，如地震断裂层距、加速度等。这些因子都将在风险区划的基础部分危险度区划阶段增加。

3.2　危险度区划

区划范围包括白沙河流域下游 51.75 km^2 灾害重建集中安置区。危险度区划评价因子共 7 个。在常规危险度区划的坡度、坡向、岩性、高差、沟床距 5 个因子指标基础上，又增加了地震断层距、斜坡临界加速度 2 项与地震因子相关的指标，代表地震因子对滑坡泥石流发育的贡献。

（1）将距离地震断层的远近按照 500 m 的间隔划分为 6 个等级：0～500 m，500～1 000 m，1 000～1 500 m，1 500～2 000 m，2 000～2 500 m，>2 500 m。然后与灾害分布图层进行叠加，计算不同地震断裂距对滑坡发育的贡献率。

（2）采用采用基于 Newmark 法的斜坡临界加速度，如式（1）所示。

$$a=(F_s-1)g\sin\alpha'。\tag{1}$$

计算白沙河小流域斜坡临界加速度分布区间为 0～1.71 g，将其按照自然断点法划分为 5 级：0～0.46 g、0.46～0.74 g、0.74～0.96 g、0.96～1.20 g、1.20～1.71 g。然后与灾害分布图层进行叠加，计算不同斜坡临界加速度对滑坡发育的贡献率。

采用区划模型式（2）进行白沙河小流域下流集中安置区滑坡泥石流危险度区划，即：

$$H=\hat{a}\ U'_{ol}\,gw_{if}\,gw'_i。\tag{2}$$

式中：H 为危险度；U'_{ol} 为评价因子贡献率；w_{if} 为因子自权重；w'_i 为因子互权重。并按照表 2 中Ⅱ类小流域区划标准（1：10 000 比例尺）进行区划，并对区划数据采用自然断点法分区，最后输出区划结果（图 4、表 3）。

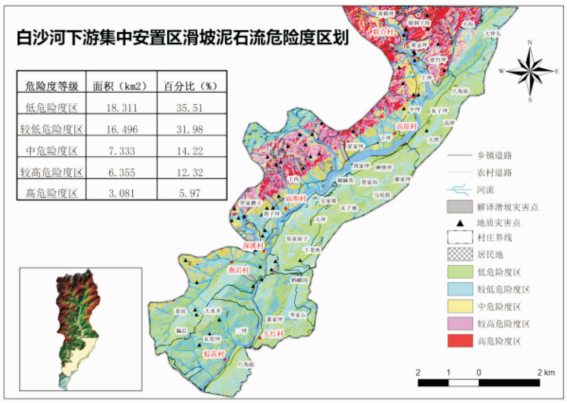


图 4　白沙河小流域下游集中安置区危险度区划

3.3　易损度区划

灾后重建时国家对地震重灾区基本采取集中安置，统一规划的方略。因此白沙河小流域的居民基本集中安置在下游 51.57 km^2 范围内。区内承灾体的性质也较地震前发生很大改变，如社会、经济、物质、资源生态等分布密度相对增大，单位价值提高，成为灾后重建区的特点。与常规的易损度评价指标相比，没有更大的差异，基本延用了社会、经济、物质、资源生态 4 大类指标选取。

表 3 白沙河小流域下游集中安置区滑坡、泥石流危险度区划统计

危险等级	危险性分类	面积/km^2	比例/%	分布范围
I_H	低度区	18.31	35.51	白沙河中下游区域，包括虹口村、深溪沟村局部范围，光荣村、久红村、棕花村、紫坪村大部范围
II_H	较低区	16.49	31.98	白沙河中下游区域，包括庙坝村、高原村、深溪沟村、虹口村局部范围，光荣村、久红村、棕花村、紫坪村大部范围
III_H	中等区	7.33	14.22	白沙河中游右岸区域，包括虹口国有林场大部，庙坝村、高原村、深溪沟村、虹口村部分范围
IV_H	较高区	6.35	12.32	白沙河中游右岸及中上游两岸区域，与高危险地区衔接，包括虹口国有林场大部，庙坝村、高原村、联合村部份范围
V_H	高度区	3.08	5.97	白沙河中游右岸及中上游两岸区域，包括虹口国有林场大部，庙坝村、高原村、联合村部份范围
总计	5 级	51.57	100	/

表 4 白沙河小流域下游集中安置区滑坡、泥石流易损度区划统计

易损等级	易损性分类	面积/km^2	比例/%	分布范围
I_V	低度区	4.212	8.17	白沙河中、下游两岸缓坡地带以上区域，包括国有林场大部、联合村、高原村、庙坝村、深溪村、燕岩村、棕花村
II_V	较低区	23.534	45.63	白沙河中、下游两岸缓坡地带以上区域，包括国有林场全部、联合村、高原村、庙坝村、深溪村、燕岩村、棕花村
III_V	中等区	8.095	15.70	白沙河中、下游两岸陡缓坡交际地带，包括高原村、庙坝村、深溪村部分地带
IV_V	较高区	13.094	25.39	白沙河中、下游两岸相对缓坡地带，包括联合村、高原村、庙坝村、棕花村、久红村部分地带
V_V	高度区	2.640	5.12	白沙河中、下游两岸缓坡人口密集地带，包括联合村、高原村、庙坝村、棕花村、久红村部分地带
总计	5 级划分	/	/	/

采用区划模型式(3)进行白沙河小流域集中安置区承载体易损度划，即：

$$V_i = \sum_{j=1}^{3} \omega_{k=1}^{Li} \sum_{k=1}^{mj} \omega_{jk} \cdot C_{jk}。 \tag{3}$$

式中：V_i为第 i 单元的易损度；ω_j^{L1}为第一层第 j 个次级目标权重；ω_{jk}为第 j 个次级目标第 k 个评价指标权重；C_{jk}为第 j 个次级目标第 k 个评价指标标准化值；m_j为第 j 个次级目标评价指标数。并按照表 2 中Ⅱ类小流域区划标准(1：10 000 比例尺)进行区划，并对区划数据采用自然断点法分区，最后输出区划结果(图 5、表 4)。

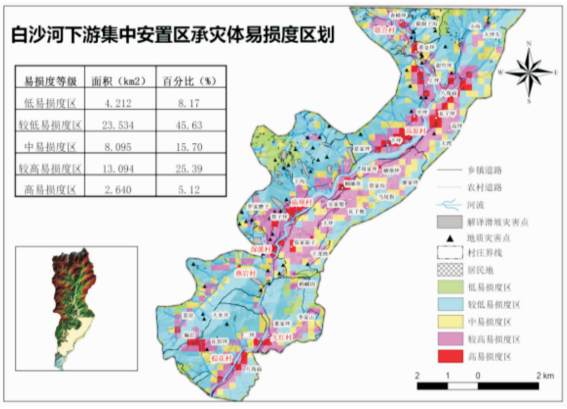


图 5 白沙河小流域下游集中安置区易损度区划

3.4 风险区划

根据危险度和易损度区划的结果，采用文献[1]的地质灾害风险区划模型，将式(2)、(3)代入式(4)，即：

$$R = H \times V;$$

或 $$R = (\sum U'_{Oi} w_{if} w'_i) \times (\sum \omega_{jk} C_{jk})。 \tag{4}$$

式中：R 为滑坡泥石流风险。采用式(4)进行地震扰动区白沙河小流域下游集中安置区滑坡泥石流风险区划，并按照表 2 中Ⅱ类小流域区划标准(1：10 000 比例尺)进行区划，并对区划数据采用自然断点法分区，最后输出区划结果(图 6、表 5)。

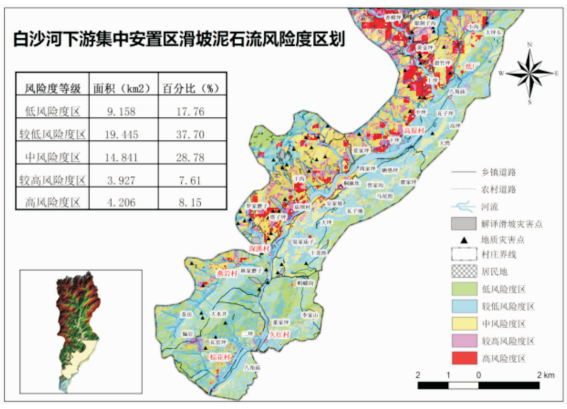


图 6 白沙河小流域下游集中安置区滑坡泥石流风险区划

表 5　白沙河小流域下游集中安置区滑坡、泥石流风险区划统计

风险等级	风险等级	面积/km^2	比例/%	分布范围
$Ⅰ_R$	低	9.158	17.76	白沙河中游左岸大部区域，以及下游左右岸大部区域，包括高原村、庙坝村部分范围，虹口场镇、燕岩村、久红村、棕花村大部区域
$Ⅱ_R$	较低	19.445	37.7	白沙河中游左岸大部区域，以及下游左右岸大部区域，包括高原村、庙坝村部分范围，虹口场镇、燕岩村、久红村、棕花村大部区域
$Ⅲ_R$	中等	14.841	28.78	白沙河中游右岸区域，包括联合村、高原村、庙坝村部分范围
$Ⅳ_R$	较高	3.927	7.61	白沙河中、下游右岸部分区域，包括联合村、高原村、庙坝村、深溪沟村部分范围
$Ⅴ_R$	高	4.206	8.15	白沙河中、下游右岸部分区域，包括联合村、高原村、庙坝村、深溪沟村部分范围
总计	5 级划分	51.577	100	/

4　结语

(1)地震扰动区是汶川 8.0 级大地震后提出的相对滑坡泥石流发育区域的概念，本文结合地震烈度的标准及野外实地调查的结果，认为可以将地震烈度的Ⅸ度区确定为有利于滑坡泥石流发育的地震扰动区。

(2)小流域为一个独立的集水地貌单元，进行小流域滑坡泥石流风险区划关键是提高区划的精度。根据小流域面积的大小，应制定适宜的区划精度标准。研究地震扰动区小流域地质灾害风险的意义在于揭示一个独立系统的地质灾害类型，演变规律，以及风险的特点。

(3)地震扰动区小流域滑坡泥石流风险区划与非地震区滑坡泥石流风险区划的主要差别是：首先准确分析地震滑坡泥石流的发育规律和特点，以及潜在的危险性；增加与地震动相关的因子，评价地震对区内滑坡崩塌泥石流的潜在影响；其次将小流域评价区域进行精细化处理后，分别采用不同尺度标准对全区域、重点区域、典型地灾体开展层次风险区划和评价，提高了风险研究的精度和可靠性。目的是形成一个完整独立地貌单元的风险区划结果，便于管理者充分掌握流域内的风险信息。

参考文献

[1] 乔建平. 滑坡风险区划. 滑坡风险区划理论与实践[M]. 成都：四川大学出版社，2010：85－89.
[2] 乔建平，王萌. 滑坡风险的类型与层次链[J]. 工程地质学报，2010，18(1)：84－90.
[3] 乔建平，杨宗佶. 滑坡风险评估的三要素[J]. 工程地质学报，2012，20(1)：1－6.
[4] 乔建平，王萌，石莉莉. 区域滑坡风险评估中的风险区划与概率分析[J]. 自然灾害学报，2012，21(2)：51－56.
[5] 乔建平，王萌，吴彩燕. 汶川地震灾区滑坡风险区划研究[J]. 工程地质学报，2015，23(2)：1－7.
[6] 乔建平，王萌，吴彩燕. 汶川 8 级地震灾区风险评估方法[J]. 灾害学，2016，31(1)：49－53.
[7] 乔建平，黄栋，杨宗佶，等. 汶川大地震宏观震中问题讨论[J]. 灾害学，2013，28(1)：1－5.
[8] 乔建平，蒲晓红. 川西南滇北接壤带地震滑坡概述[J]. 山地研究，1987，5(3)：181－188.
[9] 乔建平. 云南地震与崩塌滑坡[J]. 地理，1988，1(1)：15－22.
[10] 乔建平，蒲晓红. 川滇地震滑坡分布规律探讨[J]. 地震研究，1991，15(4)：411－417.
[11] 乔建平，黄栋，杨宗佶，等. 汶川大地震诱发滑坡的震中距[J]. 中国地质灾害与防治学报，2013，24(2)：1－7.
[12] 中华人民共和国水利部行业标准.（SL653－2013）小流域划分及编码规范[S]. 北京：中国水利水电出版社，2013.
[13] 许冲，戴福初，陈剑，等. 汶川 Ms8.0 地震重灾区次生地质灾害遥感精细解译[J]. 遥感学报，2009，13(4)：754－762.
[14] 王猛，王军，江煜，等. 汶川地震地质灾害遥感调查与空间特征分析[J]. 地球信息科学学报，2010，12(4)：480－486.
[15] 许强，李为乐. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究[J]. 工程地质学报，2010(6)：818－826.

Landslide and Debris Flow Risk Zonation at Small Watershed Scale in Wenchuan Earthquake Disturbed Area

Qiao Jianping[1,2], Wang Meng[1,2] and Wu Caiyan[3]

(1. *Key Laboratory of Geo-Surface Process and Mountain Hazards, CAS, Chengdu* 610041, *China*; 2. *Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu* 610041, *China*; 3. *Southwest University of Science and Technology, Mianyang* 621000, *China*)

Abstract: Geological hazards risk zonation at small watershed scale in seismic disturbed area mainly involves two issues. One is about the difference between the hazards in the small watershed of seismic disturbed area with them in the normal place. The other is about the difference between the geological hazards risk zonation in the particularenvironment with the general area. We discussed landslide and debris flow risk zonation of Baishahe watershed in Wenchuan Earthquake disturbed region according to these two key issues. It considered that landslide and debris flow distributed more largely and widely in a separatedgeomorphological unit of small watershed than in the none-seismic area. They would occur in a higherfrequency and have more potential hazards in the rainfall condition especially. So, in the stage of hazard zonation, it should combine with the seismic factors, evaluate the correlation with them, and highlight the damage effect of seismic vibration. Vulnerability zonation should consider hazard bearing body's seismic factors. However, risk zonation model is consistent with general area evaluation model, only considering the seismic factors in the hazard zonation stage.

Key words: seismic disturbed area; small watershed; geological disaster; risk; Wenchuan earthquake