

基于 GIS 平台与证据权的地震滑坡易发性评价

许冲^{1,2}, 戴福初², 徐锡伟¹

1. 中国地震局地质研究所, 国家地震活断层研究中心, 北京 100029

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘要: 汶川地震诱发了数以万计的滑坡灾害. 应用地理信息系统与遥感技术, 选取地震烈度、岩性、坡度、断层、高程、坡向、河流与公路 8 个因素作为汶川地震滑坡影响因子, 采用证据权方法, 对研究区内汶川地震滑坡进行灾害易发性研究. 检验表明, 易发性评价结果的正确率达到 81.855%. 不同因子组合评价结果表明, 地震烈度对滑坡易发性分区结果影响最大, 而地质、地形、人类活动因素对地震滑坡影响相对较小. 使用自然分类法则方法将研究区内滑坡按易发程度分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区与极低易发区 5 类, 极高易发区与高易发区面积之和约为 11 255.93 km², 占研究区总面积的 23.12%, 其中发育滑坡面积为 521.98 km², 占滑坡总面积的 73.36%.

关键词: 汶川地震; 滑坡; 证据权; 易发性评价; 地理信息系统; 遥感.

中图分类号: P642; P694

文章编号: 1000-2383(2012)01-1155-10

收稿日期: 2010-03-20

Earthquake Triggered Landslide Susceptibility Evaluation Based on GIS Platform and Weight-of-Evidence Modeling

XU Chong^{1,2}, DAI Fu-chu², XU Xi-wei¹

1. National Center for Active Fault Studies, Institute of Geology, Chinese Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: Wenchuan earthquake triggered tens of thousands of landslides. Eight factors that influence landslide occurrence, including seismic intensity, lithology, slope angle, faults, elevation, slope aspect, drainages, and roads were created in raster data format base on geographical information system (GIS) and remote sensing (RS) technologies. The landslide hazard map was derived by using weight-of-evidence modeling. Earthquake-induced landslide susceptibility zonings of other eight impact factor combination categories were analyzed and mapped one after another, using GIS raster analysis methods. The eight different impact factor combinations analysis suggests that seismic intensity play an important role in determining the landslide susceptibility index value, while geological, geomorphological, and human-related factors only play minor roles. The resulting susceptibility map was divided into five categories, i. e. extremely high, high, moderate, low, and extremely low by using Natural Breaks law. The validation results show satisfactory agreement between the susceptibility map and the existing data on landslide distributions in the form of area under curve (AUC) up to 81.855%. The area with extremely high and high susceptibility accounts for about 11 255.93 km², 23.12% of the study area, including landslide areas of 521.98 km², 73.36% of all landslide occurrence areas.

Key words: Wenchuan earthquake; landslide; weight-of-evidence; susceptibility evaluation; geographic information systems (GIS); remote sensing (RS).

2008-05-12(简称“5·12”),四川省汶川县映秀镇(31.0°N,103.4°E)发生里氏 8.0 级强烈地震. 此次地震释放的能量巨大,震源深度浅,从而加剧了其

破坏性. 室内遥感影像解译与现场调查表明,汶川地震诱发了大量的滑坡灾害,近期一些关于汶川地震滑坡的研究成果相继出现,具体包括以下几个方面:汶

川地震滑坡全面遥感解译与调查(苏凤环等,2008; Sato and Harp, 2009; Wang *et al.*, 2009; 许冲等, 2009a,2009c; Cui *et al.*, 2011);单体滑坡研究(许强和黄润秋,2008;殷跃平,2008,2009;常东升等,2009; Yin,2009);区域分布特点(吴树仁等,2008;谢洪等, 2008;殷跃平,2008,2009;张永双等,2008;姚鑫等, 2009; Yin,2009;许冲等,2010a, 2010b, 2010c);地震滑坡分布与环境因子统计分析(黄润秋和李为乐, 2008,2009;祁生文等,2009);区域滑坡评价研究(许冲等,2009b,2010a)等,这一系列研究的成果为接下来的研究工作提供了许多有价值的信息。

许冲等(2009b, 2010a)分别采用层次分析法(AHP)与确定性系数法(CF)进行了地震区滑坡易发性评价研究. 其中 AHP 方法在确定滑坡影响因子之间权重时有一定人为因素的干预,属于半定量的统计分析方法;CF 方法为一种二元统计分析方法,属于定量统计分析方法,其前提是假设地震滑坡影响因子之间是互不影响的,均取得了理想的易发性评价效果. 作者在以上研究工作的基础上,基于许冲等(2009a,2009c)的汶川地震滑坡数据库,拟采用证据权方法对同一研究区内的地震滑坡进行易发性评价,对证据权方法与 AHP 模型、CF 模型在地震滑坡易发性评价中的优劣进行分析对比,以期找到更适合于汶川地震滑坡易发性评价的分析模型。

1 汶川地震诱发滑坡概述

笔者所在项目组位于约 48 678 km² 的滑坡影响区范围内. 基于遥感解译,结合实地调查的方法建立了汶川地震滑坡数据库,库中包含 48 007 条汶川地震诱发滑坡面状记录. 此次地震诱发了多种类型的滑坡. 图 1 为汶川地震诱发不同类型滑坡典型照片,图 2 为研究区范围与汶川地震诱发滑坡分布图。



图 1 汶川地震诱发不同类型滑坡典型照片

Fig. 1 Different types of landslides triggered by the Wenchuan earthquake

a. 密集发育的滑坡群; b. 北川新中崩塌; c. 北川老城王家岩滑坡; d. 青川东河口高速远程碎屑流

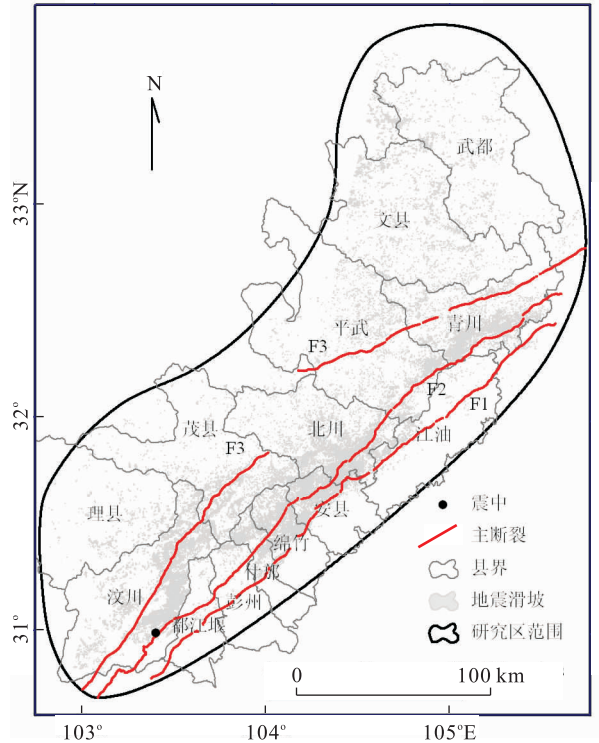


图 2 汶川地震诱发滑坡分布

Fig. 2 Wenchuan earthquake-induced landslide distribution map

2 证据权方法介绍

本文采用证据权方法进行地震滑坡的易发性评价,该方法是以贝叶斯概率统计为基础. 其最早应用于矿产资源储量评价中 (Bonham-Carter *et al.*, 1989; Agterberg, 1992), 近年来,其陆续被应用于自流井位置预测、分析地震与断层的空间关系、开采沉陷造成的岩体失稳等方面 (Daneshfar and Benn, 2002; Cheng, 2004; Zahiri *et al.*, 2006), 该方法同样被应用于滑坡评价研究中 (Lee and Choi, 2004; Neuhauser and Terhorst, 2007; 王志旺等, 2007; Dahan *et al.*, 2008a, 2008b; Sharma and Kumar, 2008;

Song *et al.*, 2008).

对于滑坡易发性评价来说,该方法基于滑坡发生区与非滑坡发生区计算每个滑坡影响因子的权重,因此对于该模型来说滑坡数据是一个必要的数据.该模型的另一个假设是未来滑坡发生在类似滑坡已发生的区域内.式(1)与式(2)用来计算滑坡发生的证据权. $P\{F|L\}/P\{F|\bar{L}\}$ 代表滑坡发生的充分率; $P\{\bar{F}|L\}/P\{\bar{F}|\bar{L}\}$ 代表滑坡发生的必要率. W_i^+ 表示当前影响因子级别发生滑坡的概率,其大小表示该影响因子级别与其内发生滑坡的正相关关系. W_i^- 表示影响因子级别以外的部分发生滑坡的概率,其表示该影响因子级别内部发生滑坡的负相关系数.两者的差值代表该影响因子级别内发生滑坡的权重,表示为式(3).该方法的数学表达式及其意义详见 Dahal *et al.* (2008a, 2008b).

$$W_i^+ = \ln \frac{P\{F|L\}}{P\{F|\bar{L}\}}, \quad (1)$$

$$W_i^- = \ln \frac{P\{\bar{F}|L\}}{P\{\bar{F}|\bar{L}\}}, \quad (2)$$

$$W_f = (W_i^+ - W_i^-). \quad (3)$$

在证据权方法中,假设影响因子间是相互独立的.证据权方法与其他二元统计方法(如信息量法、确定性系数法)相比,其优点是不但考虑了由滑坡发生的充分率得到的正权重,还考虑了由滑坡发生的必要率得到的负权重,最终权重的选择综合考虑了两者.

3 地震滑坡影响因子

本文地震滑坡影响因子的选择与许冲等(2010a)相同,选取地震烈度、岩性、坡度、与断裂距离、高程、坡向、水系与公路共8个影响因子,并分别对每个因子进行分级,分级结果见表1的第1列.下面分别对这8个影响因子进行介绍.

3.1 地震烈度

根据《汶川8.0级地震烈度分布图》,研究区烈度跨过Ⅵ级到Ⅺ级,最高烈度达Ⅺ级(汶川地震的最大烈度).根据表1的影响因子级别的证据权方法计算结果,研究区内随着烈度的降低,地震滑坡的证据权越小.Ⅸ级及Ⅸ级以上的烈度区为地震滑坡的易发烈度范围.

3.2 岩性

岩性是滑坡等地质灾害的物质基础.滑坡分布往往与岩性密切相关.按照地质图的岩性描述,将研究区内岩性概化为7类:Ⅰ类,冲洪积物;Ⅱ类,砂砾

岩、粘土岩夹砂岩、页岩,结构破碎;Ⅲ类,砂岩、夹粉砂岩、粉砂质板岩、片岩,结构较破碎;Ⅳ类,灰岩、页岩,偶夹板岩、千枚岩、砂岩,岩质较坚硬;Ⅴ类,砂岩、粉砂岩、千枚岩、灰岩,无夹层,岩质坚硬;Ⅵ类,板岩及砂岩,无夹层,岩质坚硬;Ⅶ类,侵入岩.从表1可以看出Ⅶ、Ⅳ类岩组地震滑坡易发性高.

3.3 坡度

坡度同样对滑坡发生起着重要的作用,地震滑坡的形成关键在于斜坡体是否具备有效临空面.将研究区内的坡度分级如下: $<10^\circ$, $10^\circ \sim 20^\circ$, $20^\circ \sim 30^\circ$, $30^\circ \sim 40^\circ$, $40^\circ \sim 50^\circ$, $50^\circ \sim 60^\circ$, $>60^\circ$.表1的结果表明坡度大于 40° 的区域是滑坡易发范围.

3.4 与断裂距离

对龙门山断裂带的3条主断裂(前山断裂F1、中央断裂F2、后山断裂F3,图2)分别进行距离为500、500~1000、1000~1500、1500~2000、2000~3000、3000~4000m的缓冲区分级,将震区按照断裂的影响分为19个类别(级别1~6分别为距离前山断裂500、500~1000、1000~1500、1500~2000、2000~3000、3000~4000m;级别7~12分别为距离前山断裂500、500~1000、1000~1500、1500~2000、2000~3000、3000~4000m;级别12~18分别为距离后山断裂距离前山断裂500、500~1000、1000~1500、1500~2000、2000~3000、3000~4000m;级别19为其他区域).地震滑坡明显受断裂控制,其中中央断裂(F2)的各级缓冲区证据权值均较大(表1),表明汶川地震滑坡受F2断裂影响最大.

3.5 高程

研究区数字高程模型分辨率为20m.按照如下高程分类: <1000 、 $1000 \sim 1500$ 、 $1500 \sim 2000$ 、 $2000 \sim 2500$ 、 $2500 \sim 3000$ 、 $3000 \sim 3500$ 、 $3500 \sim 4000$ 、 $4000 \sim 4500$ 、 $4500 \sim 5000$ 、 $5000 \sim 5500$ 、 >5500 m.表1中的计算结果表明 $1000 \sim 2000$ m高程范围是滑坡易发高程范围.

3.6 坡向

坡向的分布范围在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间.汶川地震属逆冲走滑断裂地震.受断层上盘推覆作用方向的影响,滑坡发生概率会在坡向上表现出差异.按照坡向每 45° 一个分带,将研究区按照平坦、北、北东、东、东南、南、南西、西、北西划分为9个等级.研究区内利于滑坡发生的坡向条件为E方向和SE方向.

3.7 与水系距离

将水系因子按照以下标准进行分类: <200 、

表 1 基于汶川地震滑坡的 8 个影响因子各个等级证据权计算

Table 1 Computed weight-of-evidence for classes of various data layers based on Wenchuan earthquake-induced landslides

影响因子及分级	栅格数	栅格数(%)	滑坡栅格数	滑坡栅格数(%)	比率	W ⁺	W ⁻	W _f
地震烈度								
1: VI	979 925	0. 805 2	158	0. 008 9	0. 011	-4. 521 7	0. 008 1	-4. 529 8
2: VII	33 747 147	27. 730 8	149 764	8. 418 8	0. 303 6	-1. 202 4	0. 240 8	-1. 443 2
3: VIII	54 272 356	44. 596 8	324 309	18. 230 7	0. 408 8	-0. 903 3	0. 396 4	-1. 299 6
4: IX	18 768 949	15. 422 9	334 017	18. 776 4	1. 217 4	0. 2	-0. 041	0. 241
5: X	8 234 811	6. 766 7	536 805	30. 175 9	4. 459 4	1. 547 7	-0. 292 8	1. 840 6
6: XI	5 692 379	4. 677 6	433 867	24. 389 3	5. 214 1	1. 715 9	-0. 234 7	1. 950 7
岩性								
1: I 类	6 180 804	5. 078 9	14 759	0. 829 7	0. 163 4	-1. 824 2	0. 044 5	-1. 868 6
2: II 类	8 280 948	6. 804 6	42 522	2. 390 3	0. 351 3	-1. 055 8	0. 047	-1. 102 7
3: III 类	4 982 141	4. 093 9	47 192	2. 652 8	0. 648	-0. 439 1	0. 015 1	-0. 454 2
4: IV 类	12 176 668	10. 005 8	300 024	16. 865 5	1. 685 6	0. 532 3	-0. 080 4	0. 612 7
5: V 类	75 896 394	62. 365 8	864 346	48. 588 2	0. 779 1	-0. 252 9	0. 317 4	-0. 570 3
6: VI 类	4 957 067	4. 073 3	22 084	1. 241 4	0. 304 8	-1. 198 5	0. 029 5	-1. 228
7: VII 类	9 221 551	7. 577 6	487 993	27. 432	3. 620 2	1. 326 2	-0. 245	1. 571 2
坡度								
1: <10°	12 787 708	10. 507 9	38 877	2. 185 4	0. 208	-1. 582	0. 090 3	-1. 672 3
2: 10°~20°	12 843 642	10. 553 9	90 244	5. 073	0. 480 7	-0. 740 2	0. 060 4	-0. 800 6
3: 20°~30°	28 754 523	23. 628 2	261 487	14. 699 2	0. 622 1	-0. 480 2	0. 112 3	-0. 592 5
4: 30°~40°	38 904 975	31. 969 1	555 194	31. 209 6	0. 976 2	-0. 024 4	0. 011 3	-0. 035 7
5: 40°~50°	22 361 909	18. 375 3	557 180	31. 321 3	1. 704 5	0. 543 8	-0. 175	0. 718 8
6: 50°~60°	5 306 897	4. 360 8	226 672	12. 742 1	2. 922	1. 101 2	-0. 093	1. 194 2
7: >60°	735 913	0. 604 7	49 266	2. 769 4	4. 579 7	1. 576 2	-0. 022 3	1. 598 5
距离断裂								
1: F1: 0~500 m	688 074	0. 565	13 043	0. 733 2	1. 296 8	0. 264 3	-0. 001 7	0. 266
2: F1: 500~1 000 m	729 475	0. 599 4	9 953	0. 559 5	0. 933 4	-0. 069 9	0. 000 4	-0. 070 3
3: F1: 1 000~1 500 m	744 900	0. 612 1	9 449	0. 531 2	0. 867 8	-0. 143 8	0. 000 8	-0. 144 6
4: F1: 1 500~2 000 m	754 383	0. 619 9	11 191	0. 629 1	1. 014 8	0. 014 9	-0. 000 1	0. 015
5: F1: 2 000~3 000 m	1 500 274	1. 232 8	24 014	1. 349 9	1. 095	0. 092 2	-0. 001 2	0. 093 4
6: F1: 3 000~4 000 m	1 416 755	1. 164 2	17 210	0. 967 4	0. 831	-0. 187 6	0. 002	-0. 189 6
7: F2: 0~500 m	852 199	0. 700 3	60 812	3. 418	4. 881 7	1. 644 8	-0. 028 2	1. 673
8: F2: 500~1 000 m	869 094	0. 714 2	59 611	3. 351	4. 692 2	1. 602 2	-0. 027 3	1. 629 5
9: F2: 1 000~1 500 m	864 559	0. 710 4	54 352	3. 055 3	4. 300 7	1. 509	-0. 024 3	1. 533 2
10: F2: 1 500~2 000 m	861 783	0. 708 1	48 112	2. 704 6	3. 819 2	1. 382 8	-0. 020 6	1. 403 4
11: F2: 2 000~3 000 m	1 706 741	1. 402 5	99 394	5. 587 3	3. 983 9	1. 427 5	-0. 044	1. 471 5
12: F2: 3 000~4 000 m	1 656 973	1. 361 6	86 001	4. 834 5	3. 550 6	1. 305 7	-0. 036 4	1. 342 1
13: F3: 0~500 m	803 491	0. 660 2	12 786	0. 718 8	1. 088 6	0. 086 2	-0. 000 6	0. 086 8
14: F3: 500~1 000 m	821 666	0. 675 2	15 426	0. 867 2	1. 284 3	0. 254 5	-0. 002	0. 256 4
15: F3: 1 000~1 500 m	827 863	0. 680 3	22 523	1. 266 1	1. 861 2	0. 634 1	-0. 006	0. 640 1
16: F3: 1 500~2 000 m	834 363	0. 685 6	23 191	1. 303 7	1. 901 4	0. 656 1	-0. 006 3	0. 662 4
17: F3: 2 000~3 000 m	1 690 111	1. 388 8	39 192	2. 203 1	1. 586 4	0. 470 2	-0. 008 4	0. 478 6
18: F3: 3 000~4 000 m	1 710 914	1. 405 9	43 339	2. 436 3	1. 732 9	0. 560 7	-0. 010 7	0. 571 4
19: 缓冲区外	102 361 955	84. 113 1	1 129 321	63. 483 5	0. 754 7	-0. 285	0. 851 7	-1. 136 7
高程								
1: <1 000 m	19 799 704	16. 269 9	182 347	10. 250 4	0. 63	-0. 467 5	0. 070 5	-0. 538
2: 1 000~1 500 m	22 965 976	18. 871 7	565 039	31. 763	1. 683 1	0. 530 8	-0. 175 4	0. 706 2
3: 1 500~2 000 m	24 682 865	20. 282 5	405 527	22. 796 2	1. 123 9	0. 118 7	-0. 032 5	0. 151 2
4: 2 000~2 500 m	17 161 003	14. 101 6	246 511	13. 857 3	0. 982 7	-0. 017 7	0. 002 9	-0. 020 6
5: 2 500~3 000 m	12 901 928	10. 601 8	151 924	8. 540 2	0. 805 5	-0. 219 1	0. 023 1	-0. 242 3
6: 3 000~3 500 m	9 882 054	8. 120 3	98 787	5. 553 2	0. 683 9	-0. 384 7	0. 028	-0. 412 6
7: 3 500~4 000 m	7 228 803	5. 940 1	84 420	4. 745 6	0. 798 9	-0. 227 5	0. 012 8	-0. 240 3
8: 4 000~4 500 m	4 825 053	3. 964 9	32 379	1. 820 1	0. 459 1	-0. 786 5	0. 022 4	-0. 809
9: 4 500~5 000 m	1 986 444	1. 632 3	11 807	0. 663 7	0. 406 6	-0. 908 7	0. 009 9	-0. 918 6

续表 1

影响因子及分级	栅格数	栅格数(%)	滑坡栅格数	滑坡栅格数(%)	比率	W^+	W^-	W_f
高程								
10:5 000~5 500 m	251 341	0.206 5	179	0.010 1	0.048 7	-3.035 7	0.002	-3.037 7
11:>5 500 m	10 396	0.008 5	Nan	Nan	0	-5.038 3	0.000 1	-5.038 4
坡向								
1:平坦	3 030 811	2.490 5	9 354	0.525 8	0.211 1	-1.566 9	0.020 2	-1.587 1
2:北	13 379 293	10.994 1	184 407	10.366 2	0.942 9	-0.059 6	0.007 1	-0.066 8
3:北东	14 250 052	11.709 6	211 530	11.890 9	1.015 5	0.015 6	-0.002 1	0.017 7
4:东	16 452 226	13.519 2	283 102	15.914 3	1.177 2	0.165 7	-0.028 5	0.194 2
5:南东	17 322 933	14.234 6	304 389	17.110 9	1.202 1	0.187	-0.034 6	0.221 6
6:南	15 208 207	12.496 9	236 407	13.289 4	1.063 4	0.062 4	-0.009 2	0.071 7
7:南西	14 126 254	11.607 9	185 236	10.412 8	0.897 1	-0.110 2	0.013 6	-0.123 8
8:西	13 804 928	11.343 8	177 945	10.003	0.881 8	-0.127 5	0.015 2	-0.142 8
9:北西	14 120 863	11.603 4	186 550	10.486 7	0.903 8	-0.102 6	0.012 7	-0.115 4
距离水系								
1:0~200 m	30 784 000	25.295 9	544 210	30.592 2	1.209 4	0.193 212	-0.074 6	0.267 8
2:200~400 m	26 700 900	21.940 7	458 778	25.789 7	1.175 4	0.164 236	-0.051 3	0.215 5
3:400~600 m	20 785 063	17.079 6	310 642	17.462 4	1.022 4	0.022 5	-0.004 7	0.027 2
4:600~800 m	15 768 157	12.957 1	200 357	11.262 8	0.869 2	-0.142 07	0.019 6	-0.161 6
5:800~1 000 m	10 323 135	8.482 8	111 587	6.272 7	0.739 5	-0.305 68	0.024 2	-0.329 9
6:>1 000 m	17 334 312	14.244	153 346	8.620 2	0.605 2	-0.508 07	0.064 5	-0.572 6
距离公路								
1:0~1 000 m	9 203 286	7.562 5	277 079	15.575 7	2.059 6	0.738 3	-0.092	0.830 3
2:1 000~2 000 m	8 361 515	6.870 8	165 543	9.305 8	1.354 4	0.308 6	-0.026 9	0.335 5
3:2 000~3 000 m	7 852 565	6.452 6	125 367	7.047 4	1.092 2	0.089 5	-0.006 5	0.096
4:3 000~4 000 m	7 454 298	6.125 4	105 367	5.923 1	0.967	-0.034 1	0.002 2	-0.036 3
5:4 000~5 000 m	7 026 799	5.774 1	86 084	4.839 1	0.838 1	-0.179	0.01	-0.189 1
6:>5 000 m	81 797 110	67.214 5	1 019 480	57.308 9	0.852 6	-0.161 6	0.268 5	-0.430 1

200~400、400~600、600~800、800~1 000、>1 000 m. 证据权值计算结果(表 1)表明水系缓冲区距离为 400 m 距离的区域内是滑坡易发区.

3.8 与公路距离

与公路距离按照如下标准进行划分:<1 000、1 000~2 000、2 000~3 000、3 000~4 000、4 000~5 000、>5 000 m 进行分类. CF 值计算结果表明(表 1),距离公路 1 000 m 的区域内为滑坡易发区.

整个研究区栅格数为 121 695 563,滑坡栅格数为 1 778 920,滑坡发生的先验概率约为 1.461 8%. 表 1 为所有评价因子级别的分级标准、分级面积占总研究区面积的百分比与分级内滑坡占总滑坡的百分比的比值(比率)、级别内发生滑坡的充分权重(W^+)、级别内发生滑坡的必要权重(W^-)和级别内发生滑坡的总权重(W_f)的计算结果汇总. 由证据权计算结果可以看到各个影响因子的滑坡易发级别: XI 与 X 烈度区,侵入岩、灰岩、页岩,大于 40°的坡度范围,距离中央断裂小于 3 000 m,高程 1 000~1 500 m,坡向 SE 与 E,距离水系小于 400 m,距离公路小于 1 000 m.

4 滑坡易发性评价与检验

4.1 计算权重与构建滑坡易发性索引图

根据汶川地震滑坡数据,分别计算每个影响因子的滑坡易发性权重. 根据式(1)与式(2),可得到:

$$W_i^+ = \ln \frac{N_{pix_1}}{\frac{N_{pix_1} + N_{pix_2}}{N_{pix_3} + N_{pix_4}}}, \quad (4)$$

$$W_i^- = \ln \frac{N_{pix_2}}{\frac{N_{pix_1} + N_{pix_2}}{N_{pix_3} + N_{pix_4}}}, \quad (5)$$

式中: N_{pix_1} 表示该影响因子级别内发生滑坡的栅格数; N_{pix_2} 表示该影响因子级别外发生滑坡的栅格数; N_{pix_3} 表示该影响因子级别内未发生滑坡的栅格数; N_{pix_4} 表示该影响因子级别外未发生滑坡的栅格数.

所有的影响因子专题图层都以栅格格式存储,栅格的大小为 20 m×20 m,利用 GIS 的空间分析功能计算出各个影响因子内所有级别的 W_i^+ 、 W_i^- 、

W_f , 结果见表 1.

总权重(W_f)表现了影响因子对滑坡的重要性. 如果总权重为正, 表明该级别利于滑坡的发生; 如果其为负, 表明其不利于滑坡的发生. 一些因子级别对滑坡的影响作用小, 其取值在 0 附近. 例如, XI 与 X 烈度区内的总权重值为正, 说明其利于滑坡的发生; 其他烈度分区权重值为负, 说明不利于滑坡的发生. 与水系距离因子的最大权重为 0.2678, 最小权重为 -0.5736, 与其他影响因子相比, 说明该因子是对地震滑坡影响最小的一个因子. 比率(滑坡栅格数(%))除以总栅格数(%)表明了影响因子区域与滑坡发生的量化关系.

通过对各个影响因子层的叠加操作, 来获得研究区的地震滑坡易发性索引(landslide susceptibility index, LSI)图. 叠加公式如下:

$$LSI = W_f Intensity + W_f Lithology + W_f Slope + W_f Fault + W_f Elevation + W_f Aspect + W_f Drainage + W_f Road. \quad (6)$$

将 8 个影响因子按照式(6)进行叠加, 得到滑坡易发性索引图, 滑坡易发指数(LSI)范围为 -12.312~8.587.

4.2 评价

滑坡易发性评价的成功率检验采用滑坡面积百分比累积-易发性面积百分比累积曲线的方法, 该方法是一种定量的滑坡易发性模型评价方法. 将易

发性评价结果按照 1% 的面积间隔从高到低分为 100 等分, 分别求取这 100 个级别内的滑坡发生的百分比, 构建易发性结果百分比累加与滑坡百分比累积曲线, 即结果评价曲线(图 3a). 从评价曲线可以看出, 10% 的滑坡易发区包含了约 55% 的滑坡; 20% 的滑坡易发区包含了约超过 70% 的滑坡; 30% 的滑坡易发区包含了约 80% 的滑坡. 利用该曲线下的面积(area under curve, 简称 AUC)来定量的表示模型的评价能力. 通过计算, 得到 AUC(Conoscenti *et al.*, 2008; Kamp *et al.*, 2008; Zezere *et al.*, 2008)值为 81.855%, 说明该易发性评价结果的准确率达到 81.855%.

4.3 检验

滑坡易发性证据权方法采用影响因子与实际滑坡数据两两统计的方式计算权重, 可以避免人为因素的影响. 但是选择的因子组合类型受人为因素的影响, 而且不能严格的避免各个因子之间的相互影响制约关系. 为弥补这个不足, 本文考虑了不同因子组合作用下的 7 种情况, 具体情况如下: 组合 1. 考虑地震与地形因子, 地震因子用烈度表示; 地形因子用坡度、坡向、高程、水系表征; 组合 2. 考虑地震、地形与地质因子, 使用的滑坡影响因子包括烈度、坡度、坡向、高程、水系、岩性与断裂 7 种; 组合 3. 考虑地震、地形与人类活动因子, 使用的滑坡影响因子包括烈度、坡度、坡向、高程、水系、公路 6 种; 组合 4.

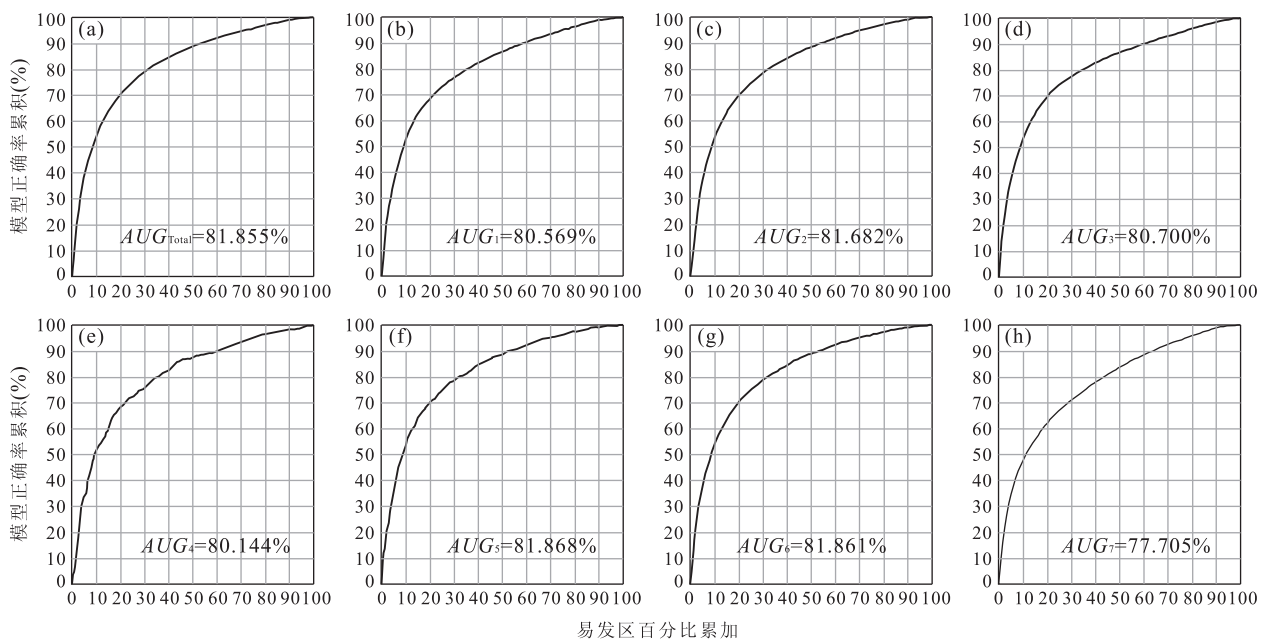


图 3 8 种滑坡影响因子组合下的易发性评价成功率检验曲线

Fig. 3 Success rate curves of landslide susceptibility values calculated from 8 impact factor combinations

考虑地震、地质与人类活动因子,使用的滑坡影响因子包括烈度、岩性、断裂与公路 4 种;组合 5. 分别选取一种地震、地形、地质、人类活动因子,即使用烈度、岩性、坡度与公路 4 种地震滑坡影响因子;组合 6. 选取 6 种互不影响的因子,即烈度、坡度、坡向、岩性、断裂与公路进行易发性评价,该组合即是许冲等(2010a)中的最优评价因子组合情况;组合 7. 选取除地震烈度外的 7 个影响因子,即岩性、坡度、断层、高程、坡向、水系、公路进行易发性评价。

根据相应的影响因子组合,按照式(6)分别进行因子叠加,并分别制作滑坡易发性面积百分比累加一滑坡面积百分比累加曲线(图 3a~3h),并计算每个组合的 AUC 值,结果见表 2。

对比这 7 种情况下的 AUC 值可知,第 5 类因子组合,即烈度、岩性、坡度与公路影响因子组合下的预测结果最准确,AUC 值达到 81.868%;其次为第 6 类因子组合,即烈度、坡度、坡向、岩性、断裂与公路的组合,AUC 值达到 81.861%。而因子组合 7 的情况下预测结果成功率最低,仅达到 77.705%。前 2 种因子组合均稍高于全部因子评价下的 AUC 值(81.855%)。同时也发现,除了因子组合 7,其他的评价结果的正确率与因子全选的情况相差不大(最大 AUC 值为 81.868%,最小 AUC 值为 80.144%),表明了烈度是汶川地震滑坡的一个较其他因子重要的影响因子。

与许冲等(2010a)的结果进行对比可知,当选择岩性、坡度、烈度、断裂、高程、坡向、水系、公路这 8 个影响因子时,许冲等(2010b)的评价结果曲线 AUC 值为 81.781%,本文评价结果曲线的 AUC 值为 81.855%,本文方法的成功率略大于许冲等(2010a),两者相差很小;对比影响因子选取烈度、坡度、坡向、岩性、断裂、公路的情况,许冲等(2010a)评

表 2 不同滑坡易发性评价因子组合及 AUC 检验结果

Table 2 Different impact factor combinations for landslide susceptibility evaluation and AUC results

组合	因子列表	AUC(%)
全选	烈度、岩性、坡度、断层、高程、坡向、河流、公路	81.855
组合 1	烈度、坡度、坡向、高程、水系	80.569
组合 2	烈度、坡度、坡向、高程、水系、岩性、断裂	81.682
组合 3	烈度、坡度、坡向、高程、水系、公路	80.700
组合 4	烈度、岩性、断裂、公路	80.144
组合 5	烈度、岩性、坡度、公路	81.868
组合 6	烈度、坡度、坡向、岩性、断裂、公路	81.861
组合 7	岩性、坡度、断层、高程、坡向、河流、公路	77.705

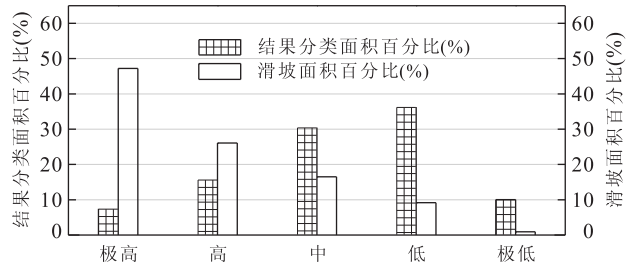


图 4 滑坡易发性统计分析结果

Fig. 4 Statistics analysis result of earthquake-induced landslide susceptibility

价曲线的 AUC 值为 82.107%,本文为 81.861%,本文的成功率略小于许冲等(2010a)。因此,笔者采用证据权方法与许冲等(2010a)采用的 CF 方法得到的结果相差较小,均在可接受范围内。而许冲等(2009)使用的 AHP 方法未考虑地震烈度,结果评价曲线的 AUC 值为 79.656%,优于此文同类因子组合,即组合 7,其 AUC 值为 77.705%,说明虽然本文方法为基于滑坡数据的统计分析方法,因子权重赋值不受人为因素的主观影响,但是没考虑因子间影响的相互作用,会对评价结果造成一定的负面影响,而 AHP 方法在因子权重选择方面具有一定的主观性,但是考虑到了因子之间相互影响的问题,也具有一定的优势。

4.4 构建最佳易发性评价结果图

针对上述对比分析结果,选择自然间距分类方法,对这 8 种影响因子(地震烈度、岩性、坡度、断层、高程、坡向、水系与公路)影响组合的情况下获得的滑坡易发性结果进行滑坡易发性分级,结果分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区与极低易发区 5 类(图 4,表 3)。其中极高易发区与高易发区面积之和约 11 255.93 km²,占研究区总面积的 23.12%,发育滑坡面积为 521.98 km²,占滑坡总面积的 73.36%。表 3 中面密度表示滑坡易发性不同级别内实际滑坡面积与易发级别总面积的百分比值。

根据图 4 与表 3 中的地震滑坡易发性分类标准构建滑坡易发性评价图(图 5),发现滑坡高易发区与极高易发区主要集中在一个沿着龙门山断裂分布的区域内。

5 结论

(1)由证据权计算结果可知:XI 与 X 烈度区,坡

表 3 滑坡易发性统计

Table 3 Susceptibility to landslide

评价结果	预测 (km ²)	百分比 (%)	实滑 (km ²)	百分比 (%)	面密度 (%)
极高易发区	3 617.39	7.43	336.11	47.24	9.29
高易发区	7 638.54	15.69	185.87	26.12	2.43
中易发区	14 848.30	30.50	117.66	16.53	0.79
低易发区	17 653.69	36.27	65.44	9.20	0.37
极低易发区	4 920.29	10.11	6.48	0.91	0.13

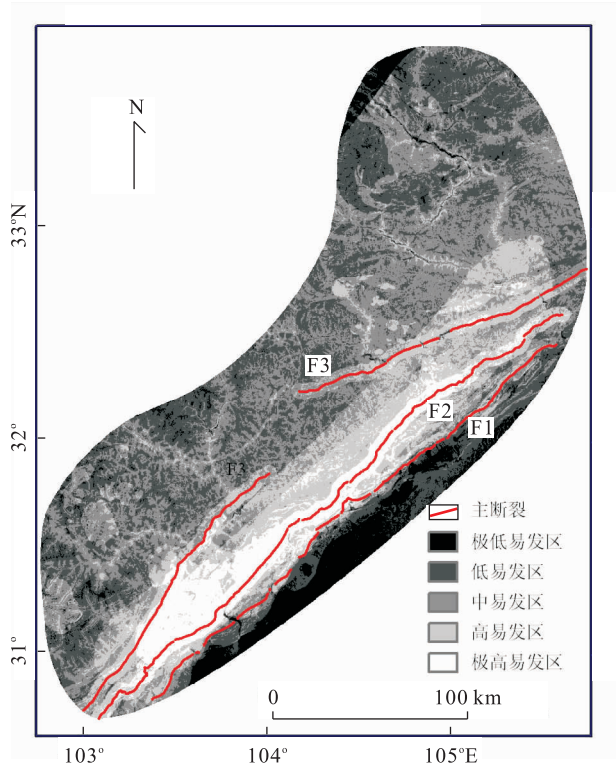


图 5 2008 汶川地震滑坡易发性评价

Fig. 5 Susceptibility map of earthquake-induced landslide

度大于 40° , 距离中央断裂 $< 3\ 000\text{ m}$, 坡向为 SE 与 E 方向, 距离水系 400 m , 距离公路 $< 1\ 000\text{ m}$, 是地震滑坡易发区域, 侵入岩组, 以灰岩、页岩为主, 偶夹板岩、千枚岩、砂岩的岩组为地震滑坡易发岩组。

(2) 应用 AUC 方法对滑坡易发性评价进行检验, 得到评价结果的正确率为 81.855% (AUC 值), 表明了实际滑坡与评价结果对应效果良好。

(3) 除了 8 个因子全部选择的情况, 还分别选取 7 类不同的因子组合, 去进行滑坡易发性评价。结果表明, 地震烈度对地震滑坡的影响最大, 而地形、地质、人类活动因素对地震滑坡易发性评价的影响作用较小。

(4) 基于 GIS 平台, 将研究区按滑坡易发程度分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区与

极低易发区 5 类。其中极高易发区与高易发区面积之和约 $11\ 255.93\text{ km}^2$, 占研究区总面积的 23.12% , 发育滑坡面积为 521.98 km^2 , 占滑坡总面积的 73.36% 。易发性评价结果表明地震滑坡受地震活动的控制作用强烈。

References

- Agterberg, F. P., 1992. Combining indicator patterns in weights of evidence modeling for resource evaluation. *Natural Resources Research*, 1(1): 39–50. doi: 10.1007/BF01782111
- Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F. P., Wright, D. F., 1989. Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. *Statistical Applications in the Earth Science*, Geological Survey of Canada Paper 89–9, 171–183.
- Chang, D. S., Zhang, L. M., Xu, Y., et al., 2009. Analysis of overtopping failure of Hongshihe landslide dam after Wenchuan earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 17(1): 50–55 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q., 2004. Application of weights of evidence method for assessment of flowing wells in the Greater Toronto area, Canada. *Natural Resource Research*, 13(2): 77–86. doi: 10.1023/B:NARR.0000032645.46747.48
- Conoscenti, C., Di Maggio, C., Rotigliano, E., 2008. GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy). *Geomorphology*, 94(3–4): 325–339. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.10.039
- Cui, P., Chen, X. Q., Zhu, Y. Y., et al., 2011. The Wenchuan earthquake (May 12, 2008), Sichuan Province, China, and resulting geohazards. *Natural Hazards*, 56(1): 19–36. doi: 10.1007/s11069-009-9392-1
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., et al., 2008a. GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*, 54(2): 311–324. doi: 10.1016/j.geomorph.2008.05.041
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., et al., 2008b. Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology*, 102(3–4): 496–510. doi: 10.1007/s00254-007-0818-3
- Daneshfar, B., Benn, K., 2002. Spatial relationships between natural seismicity and faults, southeastern Ontario and north-central New York state. *Tectonophysics*, 353(1–4): 31–44. doi: 10.1016/S0040-1951(02)00279-2
- Huang, R. Q., Li, W. L., 2008. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan

- earthquake on 12th May, 2008. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27 (12): 2585—2592 (in Chinese with English abstract).
- Huang, R. Q., Li, W. L., 2009. Fault effect analysis of geo-hazard triggered by Wenchuan earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 17(1): 19—28 (in Chinese with English abstract).
- Kamp, U., Growley, B. J., Khattak, G. A., et al., 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region. *Geomorphology*, 101(4): 631—642. doi: 10.1016/j.geomorph.2008.03.003
- Lee, S., Choi, J., 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(8): 789—814. doi: 10.1080/13658810410001702003
- Neuhauser, B., Terhorst, B., 2007. Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology*, 86(1—2): 12—24. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.08.002
- Qi, S. W., Xu, Q., Liu, C. L., et al., 2009. Slope instabilities in the severest disaster areas of “5·12” Wenchuan earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 17(1): 39—49 (in Chinese with English abstract).
- Sato, H. P., Harp, E. L., 2009. Interpretation of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008, M7.9 Wenchuan earthquake in the Beichuan area, Sichuan Province, China using satellite imagery and Google Earth. *Landslides*, 6(2): 153—159. doi: 10.1007/s10346-009-0147-6
- Sharma, M., Kumar, R., 2008. GIS-based landslide hazard zonation: a case study from the Parwanoo area, Lesser and Outer Himalaya, H. P., India. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(1): 129—137. doi: 10.1007/s10064-007-0113-2
- Song, R. H., Hiromu, D., Kazutoki, A., et al., 2008. Modeling the potential distribution of shallow-seated landslides using the weights of evidence method and a logistic regression model; a case study of the Sabae Area, Japan. *International Journal of Sediment Research*, 23(2): 106—118. doi: 10.1016/S1001-6279(08)60010-4
- Su, F. H., Liu, H. J., Han, Y. S., 2008. The extraction of mountain hazard induced by Wenchuan earthquake and analysis of its distributing characteristic. *Journal of Remote Sensing*, 12(6): 956—963 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F. W., Cheng, Q. G., Highland, L., et al., 2009. Preliminary investigation of some large landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan Province, China. *Landslides*, 6(1): 47—54. doi: 10.1007/s10346-009-0141-z
- Wang, Z. W., Li, R. Y., Wang, X. G., 2007. Zonation of landslide hazards based on weights of evidence model. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 29(8): 1268—1273 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S. R., Shi, J. S., Yao, X., et al., 2008. Analysis and evaluation of geohazard intensity of the Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Geological Bulletin of China*, 27(11): 1900—1906 (in Chinese with English abstract).
- Xie, H., Wang, S. G., Kong, J. M., 2008. Distribution and characteristics of mountain hazards induced by the earthquake of May 12 in Wenchuan, China. *Journal of Mountain Science*, 26(4): 396—401 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C., Dai, F. C., Yao, X., 2009a. Incidence number and affected area of Wenchuan earthquake-induced landslides. *Science & Technology Review*, 27(11): 79—81 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C., Dai, F. C., Yao, X., et al., 2009b. GIS-based landslide susceptibility assessment using analytical hierarchy process (AHP) for May 12, 2008 Wenchuan earthquake region. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(S2): 3978—3985 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C., Dai, F. C., Chen, J., et al., 2009c. Identification and analysis of secondary geological hazards triggered by a magnitude 8.0 Wenchuan earthquake. *Journal of Remote Sensing*, 13(4): 745—753. (in Chinese with English abstract).
- Xu, C., Dai, F. C., Yao, X., et al., 2010a. GIS based certainty factor analysis of landslide triggering factors in Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, China. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(S1): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C., Dai, F. C., Yao, X., 2010b. Study on Wenchuan earthquake-induced landslide susceptibility evaluation based on GIS platform and certainty factor analysis method. *Journal of Engineering Geology*, 18(1): 15—26 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C., Dai, F. C., Tu, X. B., et al., 2010c. Statistical analysis of the characteristic parameters of landslides triggered by the May 12, 2008 Wenchuan earthquake. *Journal of Natural Disasters*, 19(2): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Huang, R. Q., 2008. Kinetics characteristics of large

- landslides triggered by May 12th Wenchuan earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 16(6): 721—729 (in Chinese with English abstract).
- Yao, X., Xu, C., Dai, F. C., et al., 2009. Contribution of strata lithology and slope gradient to landslides triggered by Wenchuan Ms 8 earthquake, Sichuan, China. *Geological Bulletin of China*, 28(8): 1156—1162 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y. P., 2008. Research on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan. *Journal of Engineering Geology*, 16(4): 7—12 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y. P., 2009. Features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 17(1): 29—38 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y. P., Wang, F. W., Sun, P., 2009. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Landslides*, 6(2): 139—152. doi: 10.1007/s10346-009-0148-5
- Zahiri, H., Palamara, D. R., Flentje, P., et al., 2006. A GIS-based weights-of-evidence model for mapping cliff instabilities associated with mine subsidence. *Environmental Geology*, 51(3): 377—386. doi: 10.1007/s00254-006-0333-y
- Zhang, Y. S., Lei, W. Z., Shi, J. S., et al., 2008. General characteristics of “5·12” earthquake-induced geo-hazards in Sichuan. *Journal of Geomechanics*, 14(2): 109—116 (in Chinese with English abstract).
- Zeze, J. L., Garcia, R. A. C., Oliveira, S. C., et al., 2008. Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal). *Geomorphology*, 94(3—4): 467—495. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.10.040
- 附中文参考文献**
- 常东升, 张利民, 徐耀, 等, 2009. 红石河堰塞湖漫顶溃坝风险评估. *工程地质学报*, 17(1): 50—55.
- 黄润秋, 李为乐, 2008. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究. *岩石力学与工程学报*, 27(12): 2585—2592.
- 黄润秋, 李为乐, 2009. 汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析. *工程地质学报*, 17(1): 19—28.
- 祁生文, 许强, 刘春玲, 等, 2009. 汶川地震极重灾区地质背景及次生斜坡灾害空间发育规律. *工程地质学报*, 17(1): 39—49.
- 苏凤环, 刘洪江, 韩用顺, 2008. 汶川地震山地质灾害遥感快速提取及其分布特点分析. *遥感学报*, 12(6): 956—963.
- 王志旺, 李端有, 王湘桂, 2007. 证据权法在滑坡危险度区划研究中的应用. *岩土工程学报*, 29(8): 1268—1273.
- 吴树仁, 石菊松, 姚鑫, 等, 2008. 四川汶川地震地质灾害活动强度分析评价. *地质通报*, 27(11): 1900—1906.
- 谢洪, 王士革, 孔纪名, 2008. “5·12”汶川地震次生山地灾害的分布与特点. *山地学报*, 26(4): 396—401.
- 许冲, 戴福初, 姚鑫, 2009a. 汶川地震诱发滑坡灾害的数量与面积. *科技导报*, 27(11): 79—81.
- 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等, 2009b. GIS支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价. *岩石力学与工程学报*, 28(S2): 3978—3985.
- 许冲, 戴福初, 陈剑, 等, 2009c. 汶川 Ms8.0 地震重灾区次生地质灾害遥感精细解译. *遥感学报*, 13(4): 754—762.
- 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等, 2010a. 基于 GIS 的汶川地震滑坡灾害影响因子确定性系数分析. *岩石力学与工程学报*, 29(S1): 1—9.
- 许冲, 戴福初, 姚鑫, 2010b. 基于 GIS 与确定性系数分析方法的汶川地震滑坡易发性评价. *工程地质学报*, 18(1): 15—26.
- 许冲, 戴福初, 涂新斌, 等, 2010c. “5·12”汶川地震诱发滑坡特征参数统计分析. *自然灾害学报*, 19(4): 1—8.
- 许强, 黄润秋, 2008. “5·12”汶川大地震诱发大型崩滑灾害动力特征初探. *工程地质学报*, 16(6): 721—729.
- 姚鑫, 许冲, 戴福初, 等, 2009. 四川汶川 Ms 8 级地震引发的滑坡与地层岩性、坡度的相关性. *地质通报*, 28(8): 1156—1162.
- 殷跃平, 2008. 汶川八级地震地质灾害研究. *工程地质学报*, 16(4): 7—12.
- 殷跃平, 2009. 汶川八级地震滑坡特征分析. *工程地质学报*, 17(1): 29—38.
- 张永双, 雷伟志, 石菊松, 等, 2008. 四川“5·12”地震次生地质灾害的基本特征初析. *地质力学学报*, 14(2): 109—116.