

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.01.020

地质灾害引发土地利用响应机制研究 ——以四川绵竹为例

李璇琼^{1,2}, 梁延龙¹

(1. 四川建筑职业技术学院, 四川 德阳 618000; 2. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 地质灾害可造成不同程度的土地损毁及水土流失。笔者选取地质灾害频发区(四川绵竹)在汶川地震期间及震后恢复有代表性的时间段, 进行土地利用响应机制研究。结合 GIS、RS 技术与地理统计方法探究地质灾害的分布规律; 从宏观和微观 2 个尺度探索地质灾害引发的土地利用结构、幅度、速度、程度、地震烈度、水土流失及土地敏感性的时空响应机制; 总结出一套地质灾害对土地利用响应的研究方法; 并依据分析结果对灾区土地合理利用及灾后恢复提出措施。

关键词: 地质灾害; 土地利用; 响应机制; RS; GIS

中图分类号: P642.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2022)01-0236-13

Land Use Response Mechanism Caused by Geological Disaster: Taking Mianzhu City As an Example

LI Xuanqiong^{1,2}, LIANG Yanlong¹

(1. Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, Sichuan, China; 2. School of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Geological disasters cause land damage and water and soil loss. This paper carried out the land use response mechanism of the earthquake in disaster-prone area of Mianzhu city in Wenchuan earthquake and its recovery periods. Based on GIS, RS technology and geographical statistics method, the distribution law of geological hazards were analyzed. The response mechanism in the structure, the amplitude, the speed and the degree of land use, the seismic intensity, the water and soil loss and the land sensitivity caused by geological hazards was explored from both macro and micro dimensions. The authors summarized some research methods of land use response to geological disasters and also put forward some measures to rationally utilize land in the disaster area.

Keywords: earthquake; land use; response mechanism; RS; GIS

中国是一个地质灾害频发的国家, 50% 以上的国土面积受到地震、崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害

的影响, 造成耕地损毁、房屋损毁和水土流失加剧。而土地利用类型、程度的变化又会间接引发地质灾

收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-06-23; 网络发表日期: 2021-12-06; 责任编辑: 穆华一

基金项目: 德阳市科技计划重点研发项目“地震引发土地利用响应研究”(2020SZZ051)。

作者简介: 李璇琼(1984-), 女, 博士研究生, 副教授。研究方向: 遥感与 GIS 应用, 土地资源管理。E-mail: 195508249@qq.com。

害。因此,地质灾害与土地利用关系的研究具有重要意义(谭梦,2013;李磊,2019;彭义,2014;曹慧,2007;刘惠敏等,2001)。国内外学者多数是在某一时刻就某一具体地质灾害实例研究二者之间关系,而较少进行地质灾害分布规律与土地利用时空耦合关系的挖掘(Burby R. J, 2000; Smith, S. M, 2001; D. H. Bell, 1985; Abuk, A, 2001; Dai, F. C, 2001; Michael, J. C, 2004)。

笔者选取灾害频发区绵竹市在汶川地震期间及 2009~2018 年震后恢复有代表性的时段,从宏观和微观 2 个尺度进行地质灾害土地利用机制分析。以遥感影像和实测地灾点数据为基础,采用数字图像处理、监督分类等遥感技术,结合地理信息系统的区域统计、缓冲区分析、叠加分析、核密度分析、地理统计等方法探究地质灾害分布特征。通过多空间多时间尺度探索地质灾害与土地利用结构、幅度、速度、利用程度、地震烈度、土地敏感性及水土流失的耦合机制,总结出一套地质灾害对土地利用响应的研究方法,并对灾区土地利用合理规划及地质灾害的防治提供决策依据。

1 研究区概况

绵竹市位于四川盆地西北部,背倚龙门山脉,地处北纬 $31^{\circ}09' \sim 31^{\circ}42'$,东经 $103^{\circ}54' \sim 104^{\circ}20'$;面积为 $1\,245.3\text{ km}^2$,自西北向东南伸展,东西宽约 42 km,南北长约 61 km;地势西北高(属龙门山地区),多为山地,河流纵横,切割强烈,切割深度为 500~1 000 m,河床狭窄,河谷陡峻,东南低,(属成都平原的一部分),多为平原,由西北至东南逐渐倾斜,海拔高度为 504~4 405 m,相对高差 3 900 余米,高差悬殊;山地、平原界限分明,地貌类型多样,有“六山一水三分田”的特点。

研究区地质灾害频发,尤其是 2008 年 5 月 12 日的汶川大地震引发了滑坡、崩塌、泥石流次生地质灾害。调查结果表明,震后新增灾害点 142 处,其中滑坡 78 处,崩塌 129 处,泥石流 41 处。造成房屋毁埋,耕地及植被遭到破坏,环境承载力明显下降。

2 研究区地质灾害分布特征

2.1 地震烈度分布

根据中国地震局公布的汶川地震烈度,绵竹烈度包含了Ⅶ度、Ⅷ度、Ⅸ度、Ⅹ度 4 个等级,总体较高。根据面积统计出Ⅹ级烈度区域占市总面积 41.74%;Ⅸ级烈度区域占 31.41%;Ⅷ级烈度区域占 26.34%;Ⅶ级烈度区域占 0.51%。研究区总体地震烈度由南至北逐渐升高(图 1)。将地灾点叠加地震烈度分布(图 1),显示崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害主要分布在地震烈度等级Ⅹ级和Ⅸ级的区域。

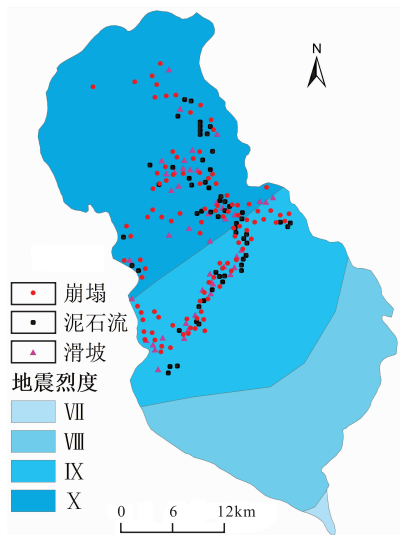


图 1 绵竹地震烈度分布图

Fig. 1 Seismic intensity distribution of Mianzhu

2.2 地灾点分布

研究区地灾点分布见图 2,显示地灾点主要分布于研究区北部和中部地震烈度较高的区域。

2.3 地质灾害分布与地形相关性

2.3.1 地质灾害点与地形关系

将地灾点叠加在高程分布图上(图 2),显示地灾点主要分布在高程 600~3 000 m 的中高地形区域。同样叠加坡度分布图(图 3),可知研究区地灾点主要分布在坡度 $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 的中高坡度区域。

2.3.2 地震烈度与地形关系

研究区地震烈度随高程、坡度升高而增加。北部地形高,地震烈度大,南部地势低,地震烈度小。

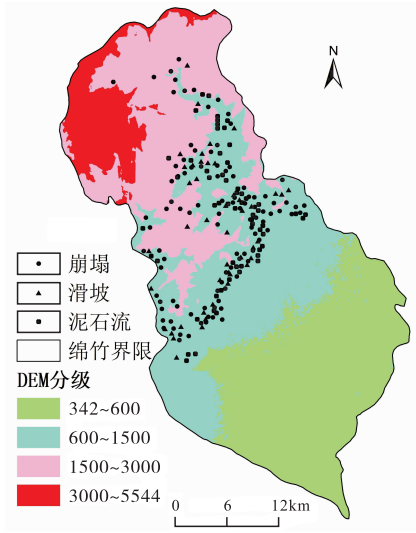


图 2 地灾点与高程分布关系图

Fig. 2 Relationship between disaster and elevation

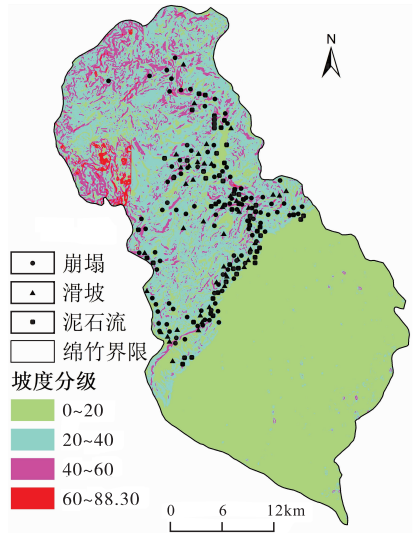


图 3 地灾点与坡度分布关系图

Fig. 3 Relationship between disaster and slope

2.4 地质灾害分布与沟壑密度相关性

沟壑密度的定义为流域中干支流总长度和流域面积之比,是地形发育阶段和地表抗蚀能力的重要特征值,是描述地形切割破碎程度的一个重要指标。沟壑密度越大,地面径流和冲蚀侵蚀越强烈,沟蚀切割发展越快。因此,沟壑密度对地质灾害的发育有较为重要的影响。

利用绵竹 1:5 万 DEM 数据,通过水文分析工具进行河网和流域提取,共提取出小流域 1 345 个。基于 ARCGIS 空间分析平台统计每个小流域内的

河网长度及流域面积,二者相除计算出沟壑密度。计算结果及分布情况见图 4。其显示区内沟壑密度集中分布在 0.60~2.96 km/km² 区间内,整体较高,说明工作区沟壑密集,地形较为破碎。将沟壑密度重分类成 5 个等级,0~0.6 km/km² 为低沟壑密度区域;0.6~1.19 km/km² 为中低沟壑密度区域;1.19~1.91 km/km² 为中沟壑密度区域;1.91~2.96 km/km² 为中高沟壑密度区域;2.96~5.41 km/km² 为高沟壑密度区域。

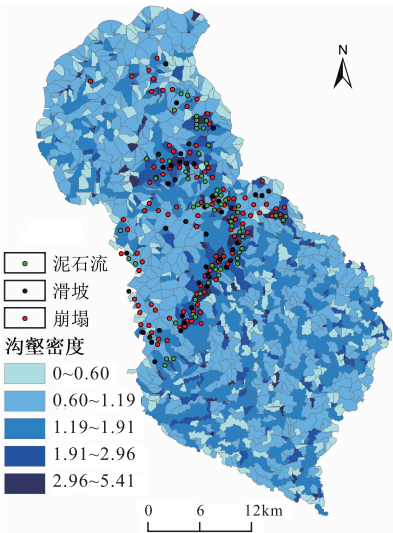


图 4 小流域沟壑密度分布图

Fig. 4 Gully density distribution of watershed

叠加研究区地质灾害分布点可知,崩塌、滑坡、泥石流分布在沟壑密度较高的区域。统计各沟壑密度等级区域面积比例,得到饼状图(图 5)。表明研究区中低和中沟壑密度区域范围最大,高沟壑密度区域范围最小。统计 2007、2009、2018 三期各沟壑密度等级区域未利用地面积比例,得到折线图(图 6)。揭示各沟壑密度等级中的未利用地比例都为 2007~2009 年增大,2009~2018 年减小。其中,高沟壑密度等级和中高沟壑密度等级变化的幅度最大。说明地震期间中高和高沟壑密度区域土地破坏最为严重,震后得到了有利的恢复,这与地质灾害点分布在中高和高沟壑密度等级区域相对应。利用空间分析工具提取各泥石流、滑坡和崩塌点的沟壑密度值,生成盒须图(图 7)。显示泥石流灾点分布的沟壑密度最高,崩塌和滑坡次之。表明研究区沟壑密度对地质灾害的影响程度为泥石流>崩塌>滑坡。

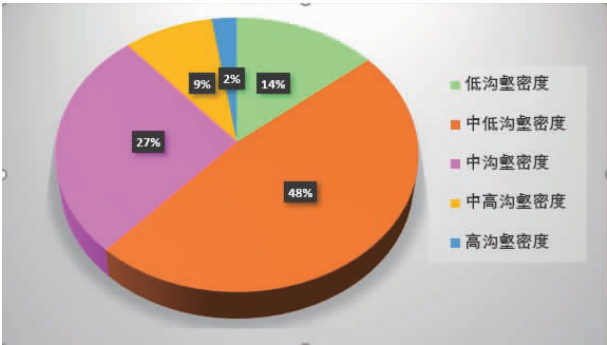


图 5 各沟壑密度等级面积统计图

Fig. 5 The area statistics of each gully density range

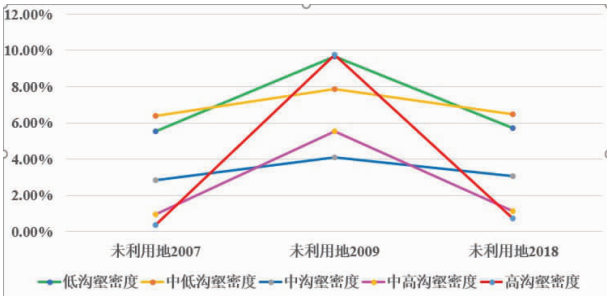


图 6 各沟壑密度等级未利用地变化趋势图

Fig. 6 Unused land variation trend of each gully density range

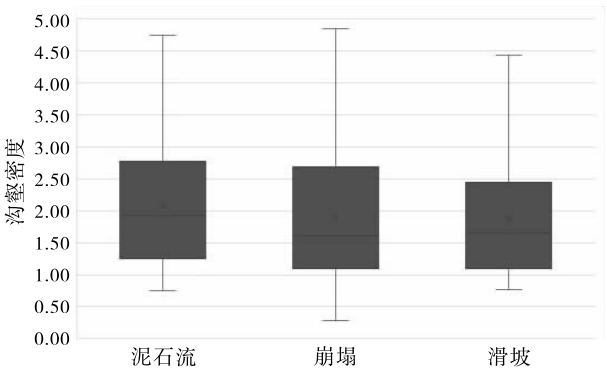


图 7 地灾点沟壑密度分布图

Fig. 7 Gully density distribution of disaster spots

3 地质灾害土地利用宏观响应

土地利用宏观响应分为地震期及震后恢复 2 个阶段,研究整个绵竹市土地利用结构、幅度、速度、程度、地震烈度、土地敏感性、沟壑密度及水土流失响应(李璇琼,2010,2015;李鹏杰,2012;魏巍,2012;金雄兵,2003)。

3.1 研究区土地利用信息提取

笔者数据源采用绵竹 2007 年 5 月 6 日、2009 年 6 月 12 日 LandSat5 影像及 2018 年 6 月 5 日 LandSat8 共 3 期遥感影像,轨道编号为 129-38。遥感图像的分类方法有很多,监督分类应用较为广泛。监督分类又称训练场地法,是以建立统计识别函数为理论基础,依据典型样本训练方法进行分类的技术。可通过反复检验训练样本,来提高分类精度。

本研究结合第三次全国土地调查土地分类系统和《土地利用现状分类(GB/T21010-2007)》,根据研究区具体情况,利用监督分类的最大似然算法将研究区土地利用类型分为 6 类。第一类为耕地,对应 2 个分类体系的一级地类耕地;第二类为林地,对应 2 个分类体系中一级地类林地;第三类为水域,对应 2 个分类体系中的一级地类水域及水利设施用地;第四类为建设用地,对应《土地利用现状分类(GB/T21010-2007)》中的一级地类建设用地,包含了第三次全国土地调查土地分类系统体系中商服用地、工矿仓储用地、住宅用地、公共管理与公共服务用地、特殊用地等一级地类;第五类为道路,对应 2 个分类体系中的交通运输用地;第六类为未利用地,对应 2 个分类体系中的一级地类其他土地。分类结果见图 8~图 10,图中显示研究区林地、耕地资源较为丰富,河流分布较为密集。

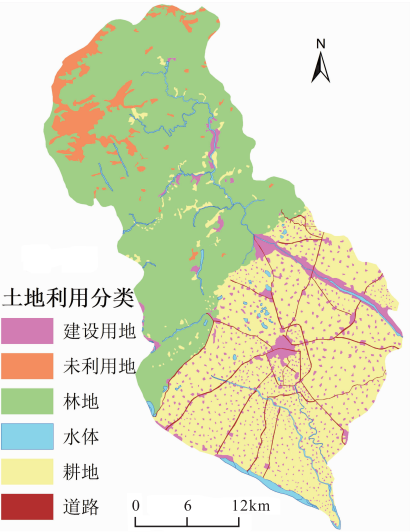


图 8 2007.05.06 土地利用分类图

Fig. 8 Land use classification on 2007. 05. 06

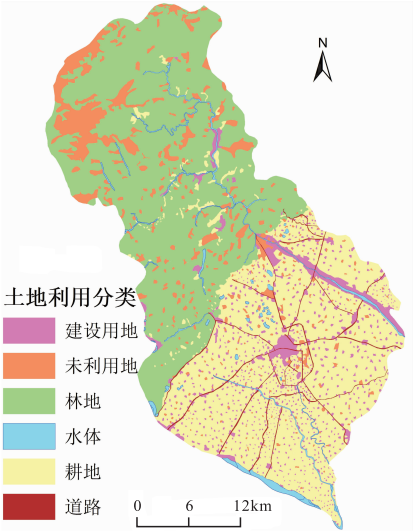


图 9 2009.06.12 土地利用分类图

Fig. 9 Land use classification on 2009.06.12

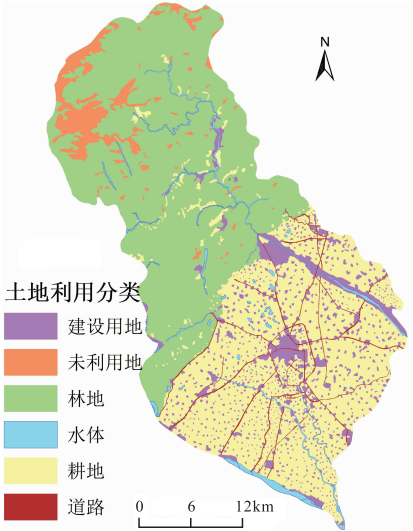


图 10 2018.06.05 土地利用分类图

Fig. 10 Land use classification on 2018.06.05

3.2 土地利用结构响应

利用 GIS 的区域统计功能,计算研究区不同时期各土地利用类型面积,分析面积变化,结果见表 1。显示地震期间绵竹土地利用结构发生了较大的变化。林地、耕地、建设用地大幅度减少,未利用地增加,主要是由于地震导致土地损毁,转化为未利用地。震后随着绵竹城市灾后重建、城镇化进程及经济快速发展,土地利用结果也明显变化,耕地与未利用地减少,建设用地、道路增加明显。

3.3 土地利用幅度响应

通过某时间段一种土地利用类型变化量与起始时间面积比来研究土地利用幅度演化,体现不同类型的土地利用情况在数量上的波动。通过运算,具体变化幅度结果见表 2。

表 2 显示 2007~2009 年建设用地、林地、耕地损毁分别为 8.57%、6.99%和 2.16%;未利用地大幅度增长了一倍。2009~2018 年建设用地增加 40.93%,道路增加 14.94%。

3.4 土地利用速度响应

3.4.1 单一土地利用类型动态度

为了量化研究时段内土地利用类型的变化情况以及土地类型的动态度,引入单一土地利用动态度的概念,在数量上反映研究区土地利用类型面积的年变化。根据相关公式计算出绵竹市各时间段单一土地利用动态度数值(表 3)。

表 3 揭示绵竹建设用地、耕地、林地在地震期间呈现减弱的趋势,地震的破坏导致了未利用地的极大增长,建设用地损毁速度最快。震后林地、建设用地、道路、水体都呈“涨势”,耕地和未利用地呈“落势”,道路增长速度最为迅速。总体时段道路、未利用地与建设用地增加,耕地、林地、水体减少,建设用

表 1 绵竹土地利用分类统计结果表(m²)

Tab. 1 Statistical classification results of TM images(m²)

地类名称	2007 年 5 月 6 日	2009 年 6 月 12 日	2018 年 6 月 5 日	2007~2009 年变化 (地震期间)	2009~2018 年变化 (震后恢复)
耕地	485 947 211.14	475 450 336.28	459 741 117.51	-10 496 874.86	-15 709 218.77
林地	584 282 626.62	543 423 967.83	582 377 684.92	-40 858 658.79	38 953 717.09
建设用地	80 956 059.83	74 017 875.37	104 312 750.34	-6 938 184.46	30 294 874.97
水体	30 272 338.71	30 216 911.71	30 227 717.71	-55 427	10 806
未利用地	58 346 896.12	116 696 041.23	60 564 514.12	58 349 145.11	-56 131 527.11
道路	17 281 656.15	17 281 656.15	19 863 003.97	0	2 581 347.82

表 2 土地利用类型动态幅度变化(m²)

Tab. 2 Change of dynamic amplitude of land use type(m²)

变化时间	耕地	林地	建设用地	水体	未利用地	道路
2007~2009 年	-2.16%	-6.99%	-8.57%	-0.18%	100.00%	0.00%
2009~2018 年	-3.30%	7.17%	40.93%	0.04%	-48.10%	14.94%
2007~2018 年	-5.39%	-0.33%	28.85%	-0.15%	3.80%	14.94%

表 3 单一土地利用动态度表(年)

Tab. 3 Single dynamic amplitude of land use(Year)

指数	地类名称	2007~2009 年	2009~2018 年	2007~2018 年
P _s	耕地	-1.06	-0.05	-0.89
	林地	-1.01	0.99	-0.60
	建设用地	-4.47	0.97	0.85
	水体	-0.20	0.25	-0.22
	道路	0.00	4.47	1.00
	未利用地	100.00	-0.99	0.76

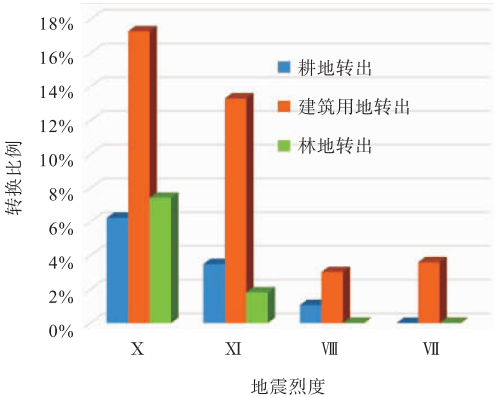


图 11 各地震烈度级别土地利用转化图

Fig. 11 Land use transformation in each earthquake intensity range

地增加趋势最快,耕地减少趋势最快。

3.4.2 综合土地利用类型动态度

综合土地利用动态度的值反映该区土地利用综合年变化率。经计算得出地震期间、震后恢复、总体时段年综合土地利用动态度分别为 1.19%、0.36%、0.11%。说明地震期间年土地利用变化速度最快,地震为主要影响因素。

3.5 土地利用程度响应

土地利用程度综合反映了土地自然属性与人文因素的综合效应。根据刘纪远等提出的土地利用程度的综合分析方法(Liu J-Y,2000),计算出研究区 2007 年、2009 年、2018 年土地利用综合程度指数分别为 249.64、243.06、251.49。地震期间耕地、建设用地、林地转化为未利用的灾毁土地,土地利用程度也就处于衰退的趋势。震后随着城市建设、交通用地增加,土地利用程度总体增强。

3.6 土地利用地震烈度响应

分析统计地震期间每个烈度区域土地利用转化面积及占该区域面积比例见图 11。其显示地震烈度Ⅺ级区域耕地破坏比例为 3.49%,烈度最大的 X 级区域破坏比例为 6.23%,依次增加。建设用地和林地损毁的趋势都随着地震烈度增强而升高。地震烈度的土地利用响应程度依次为建设用地>林地>耕地。

3.7 地质灾害引发的水土流失响应

笔者利用 ARCGIS 与 MATLAB 相结合,对水土流失相关的土地利用、植被盖度、坡度、沟壑密度及降雨量等 5 个因子编程,实现遗传神经网络(GA-BP)算法(李璇琼,2012),得到最终的水土流失分结果图。算法流程见图 12,结果见图 13~图 15。

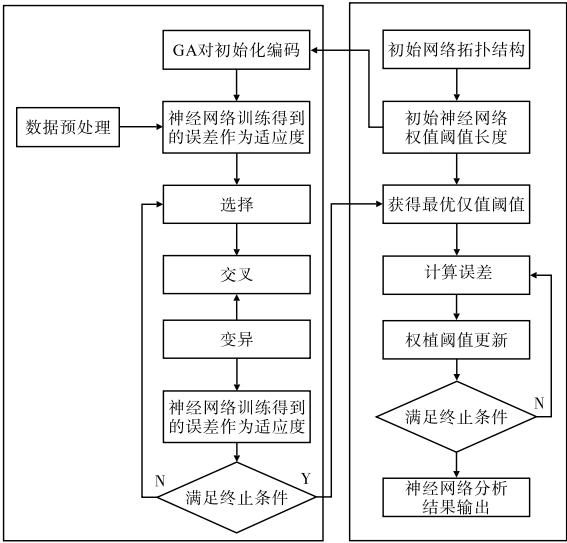


图 12 GA-BP 模型建立流程图

Fig. 12 Flow chart of GA-BP model

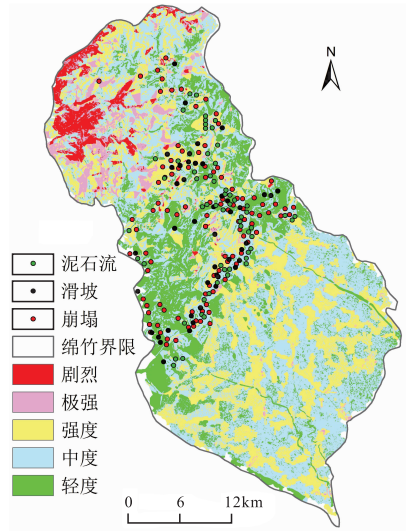


图 13 2007.05.06 水土流失分级图

Fig. 13 Soil and water erosion on 2007.05.06

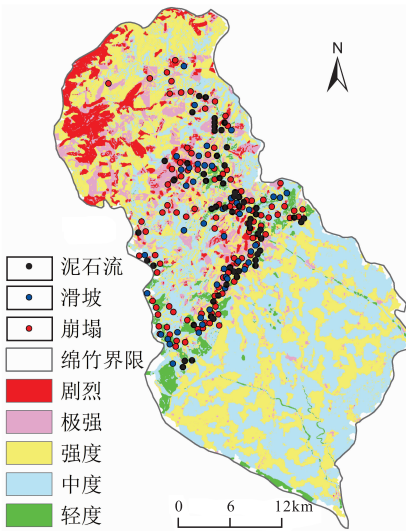


图 14 2009.06.12 水土流失分级图

Fig. 14 Soil and water erosion on 2009.06.12

叠加地质灾害分布点,统计每个水土流失等级崩塌、滑坡、泥石流灾害点的频度,结果见表 4。显示 2007 年震前,轻度和中度区域灾害点分布较多,2009 年减少,2018 年经过恢复呈“涨势”。2007 年震前,剧烈、极强和强度范围地灾点频度较低,2009 年震后增加,2018 年经过恢复频度呈“落势”。

4 地质灾害土地利用微观响应

微观响应利用崩塌、滑坡、泥石流点缓冲区为研

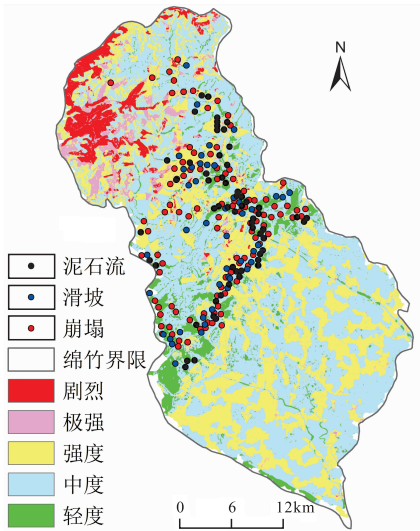


图 15 2018.06.05 水土流失分级图

Fig. 15 Soil and water erosion on 2018.06.05

究区,分析地质灾害土地利用结构、类型、幅度、速度、程度、沟壑密度及水土流失响应。

4.1 地灾点缓冲区建立

根据前人研究经验结果,结合研究区实际情况,通过实验最终选取 1 500 m 作为缓冲半径(杨德生, 2011)。以采样点为中心,建立半径为 1 500 m 的缓冲区,再分析缓冲区内地质灾害土地利用响应(图 16、图 17、图 18)。

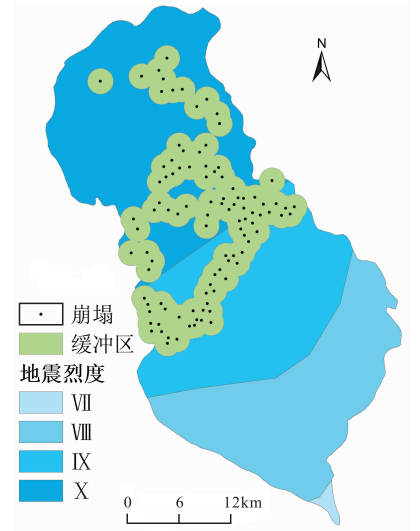


图 16 崩塌点缓冲区图

Fig. 16 Buffer of collapse points

4.2 土地利用结构响应

对崩塌、滑坡、泥石流地灾点缓冲区内的土地利

表 4 各水土流失等级地灾点分布表(个)

Tab. 4 Distribution of disaster spots of each soil and water erosion range (Quantity)

水土流失级别	泥石流			滑坡			崩塌		
	2007 年	2009 年	2018 年	2007 年	2009 年	2018 年	2007 年	2009 年	2018 年
剧烈	1	3	1	0	3	0	1	8	2
极强	1	11	3	3	11	2	6	27	8
强度	11	23	10	14	17	15	32	44	29
中度	30	13	31	20	10	20	48	13	46
轻度	16	9	14	7	3	7	13	8	15

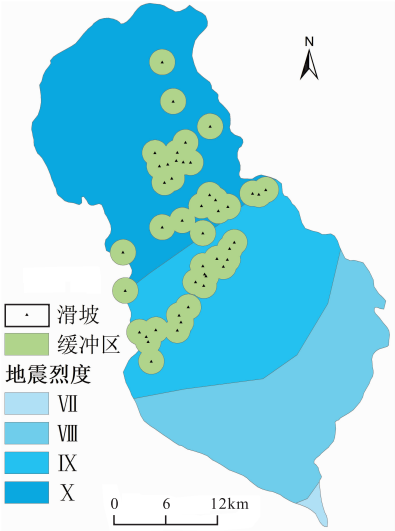


图 17 滑坡点缓冲区图

Fig. 17 Buffer of landslide points



图 18 泥石流点缓冲区图

Fig. 18 Buffer of debris flow points

用结构进行统计分析,结果见表 5。说明崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害对林地的影响最大,影响程度为林地>耕地>建设用地。

4.3 土地利用幅度响应

对崩塌、滑坡、泥石流地灾点缓冲区内的土地利用结构进行统计分析,结果见表 6。表中显示地震期间崩塌、滑坡、泥石流缓冲区未利用地分别增加了 1 803.48%、2 315.46%和 3 716.82%,高出整个绵竹未利用地比例(表 2)的 18~37 倍。说明对地质灾害区域土地利用影响非常大。耕地、林地受滑坡影响最强烈,建设用地损毁比例在泥石流缓冲区最大。

4.4 土地利用速度响应

土地利用速度响应主要通过年综合土地利用动态度分析。具体见公式 1。

$$LC = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \right\} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

公式(1)中, LU_i 为监测时间段初始状态下第 i 类土地利用类型面积; ΔLU_{i-j} 为研究时段内第 i 类土地利用类型转为非 i 类土地利用类型面积和非第 i 类土地利用类型转为 i 类土地利用类型面积之和; T 为研究时段长度。

利用公式计算出地灾点缓冲区地震期间、震后恢复及总体时段的年综合土地利用动态度,结果见表 7。显示地灾点缓冲区动态度整个绵竹的 25~27 倍主要由于地震影响引发次生灾害。响应速度为泥石流>滑坡>崩塌。说明泥石流引发灾害区域土地利用类型速度变化最快。

表 5 地灾缓冲区土地利用类型结构表
Tab. 5 Land use type structure of disaster buffer range

地类名称	崩塌缓冲区			滑坡缓冲区			泥石流缓冲区		
	2007 年	2009 年	2018 年	2007 年	2009 年	2018 年	2007 年	2009 年	2018 年
耕地	7.49%	7.17%	7.76%	6.79%	6.35%	7.13%	11.74%	11.32%	11.90%
林地	85.58%	78.74%	85.18%	86.54%	78.50%	86.17%	79.12%	71.87%	78.65%
建设用地	3.27%	2.40%	2.92%	3.07%	2.22%	2.58%	4.55%	3.01%	4.31%
水体	2.88%	2.86%	2.87%	3.11%	3.08%	3.08%	3.58%	3.58%	3.58%
未利用地	0.45%	8.50%	0.95%	0.40%	9.76%	0.94%	0.25%	9.46%	0.72%
道路	0.33%	0.33%	0.33%	0.09%	0.09%	0.09%	0.76%	0.76%	0.72%

表 6 土地利用类型幅度变化表(年)
Tab. 6 Change of land use type amplitude(Year)

地类名称	崩塌缓冲区			滑坡缓冲区			泥石流缓冲区		
	2007~2009	2009~2018	2007~2018	2007~2009	2009~2018	2007~2018	2007~2009	2009~2018	2007~2018
耕地	-4.30%	8.28%	3.62%	-6.49%	12.34%	5.05%	-3.53%	5.14%	1.43%
林地	-8.00%	8.18%	-0.47%	-9.29%	9.76%	-0.43%	-9.17%	9.44%	-0.60%
建设用地	-26.70%	21.47%	-10.96%	-27.79%	16.55%	-15.84%	-33.89%	43.43%	-5.18%
水体	-0.63%	0.12%	-0.50%	-0.96%	0.19%	-0.77%	0.00%	0.00%	0.00%
未利用地	1 803.48%	-88.86%	112.10%	2 315.46%	-90.34%	133.22%	3 716.82%	-92.36%	191.63%
道路	0.00%	0.02%	0.02%	-0.0001%	0.0001%	0.00%	0.00%	8.83%	8.83%

表 7 地灾点缓冲区综合土地利用动态表(年)
Tab. 7 Dynamic attitude of comprehensive land use in disaster range(Year)

区域	崩塌缓冲区			滑坡缓冲区			泥石流缓冲区		
	2007~2009	2009~2018	2007~2018	2007~2009	2009~2018	2007~2018	2007~2009	2009~2018	2007~2018
土地利用年 综合动态度	18.60%	0.40%	0.26%	23.80%	0.41%	0.32%	31.92%	0.50%	0.43%

4.5 土地利用程度响应

土地利用程度综合指数模型是将土地利用的综合指标进行数学整合,形成一个连续分布的综合指数,其数值的大小综合反映了某一地区土地利用的程度。计算公式为:

$$Li = 100 \times \sum_{i=1}^n Ai Ci \quad L \in [100, 400] \quad (2)$$

公式 2 中, L_i 为某研究区域土地利用程度综合指数; A_i 为研究区域第 i 级土地利用程度分级指数; C_i 为研究区域内第 i 级土地利用程度分级面积百分比; n 为土地利用程度分级数。据公式 2 计算出地质灾害点缓冲区的土地利用程度综合指数见表

8。显示灾害点缓冲区土地利用程度均低于研究区综合水平。地震期间地灾点缓冲区土地利用程度减弱,灾害恢复阶段增强。滑坡区地震期间土地利用程度衰退幅度最大,泥石流区震后增加幅度最强。

4.6 地质灾害引发土地敏感性响应

为了从土地利用的角度探讨人类活动与地质灾害的相关性,引入了敏感系数的概念,以敏感性定量分析不同土地利用类型地质灾害的敏感性(何易平,2005;陈和平,2002;吴常润,2020;仲佳鑫,2018)。采用灾点法分析,具体见公式 3。

$$SC_i = \ln(Dens\ Class_i / Dens\ Map) \quad (3)$$

公式 3 中, SC_i 为第 I 类土地利用类型的敏感

性; $Dens\ Class_i$ 为某类灾害在类土地利用类型中分布的面积比率或出现的频率; $Dens\ Map$ 为所有该类灾害总的面积比率或频率。对每一类缓冲区范围内的敏感性系数进行计算,结果见表 9。

表 8 地灾点缓冲区土地利用综合指数表
Tab. 8 Land use composite index of disaster point buffer

区域	崩塌缓冲区			滑坡缓冲区			泥石流缓冲区		
	2007 年	2009 年	2018 年	2007 年	2009 年	2018 年	2007 年	2009 年	2018 年
综合指数	214.24	204.13	213.33	212.35	201.21	211.51	214.69	209.40	221.01

表 9 各土地利用类型地质灾害敏感系数表
Tab. 9 Sensitivity coefficient of geological hazard of each land use type range

地类名称	崩塌缓冲区			滑坡缓冲区			泥石流缓冲区		
	2007 年	2009 年	2018 年	2007 年	2009 年	2018 年	2007 年	2009 年	2018 年
耕地	0.109	0.089	0.089	0.067	0.089	0.067	0.119	0.119	0.085
林地	0.881	0.812	0.891	0.911	0.889	0.933	0.797	0.661	0.814
建设用地	0.010	0.010	0.010	0.000	0.022	0.000	0.068	0.051	0.085
水体	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
未利用地	0.000	0.089	0.010	0.022	0.178	0.000	0.000	0.169	0.017
道路	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.017	0.017

计算结果表明:地震期间耕地对滑坡敏感性增强;林地对崩塌、滑坡、泥石流敏感性减弱;建设用地上对滑坡敏感性增强,对泥石流敏感性减弱。震后恢复阶段耕地、未利用地对各地质灾害的敏感性减弱;林地对各地质灾害敏感性增强;建设用地上对滑坡敏感性减弱,对泥石流敏感性增加。耕地和林地对地质灾害敏感性最强。

4.7 地质灾害引发水土流失响应

以地灾点缓冲区为分析范围,生成核密度图(图 19、图 20、图 21)。利用空间分析工具提取每个地灾点的核密度和水土流失值,进行回归分析,探索地灾点核密度和水土流失的相关性(图 22、图 23、图 24)。揭示水土流失程度与地灾点核密度成线性正相关,地质灾害分布越密集,水土流失程度越严重。

5 土地利用优化措施建议

通过以上计算、分析及研究,借鉴国内外先进的土地利用、利用理念,结合研究区实际,提出以下土地合理规划利用建议。

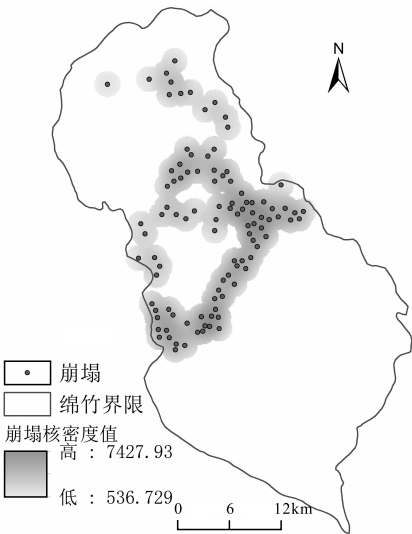


图 19 崩塌点核密度图
Fig. 19 Kernel density of Collapse points

(1)因在 25 度坡以上的地区耕作,使得斜坡上部土层结构松散,土体粘聚力显著降低,降雨渗入土体饱和后容易形成水土流失,故应改为梯田方式进行耕作,并在耕地周围加强防护林建设。

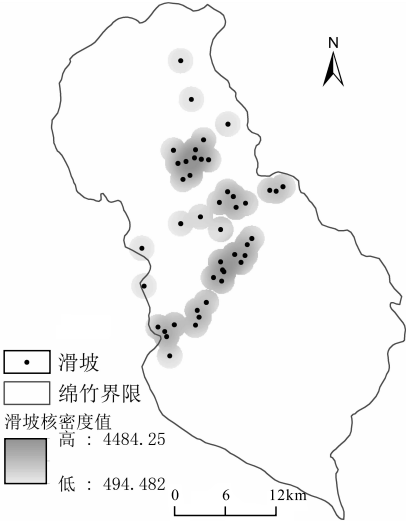


图 20 滑坡点核密度图

Fig. 20 Kernel density of landslide points

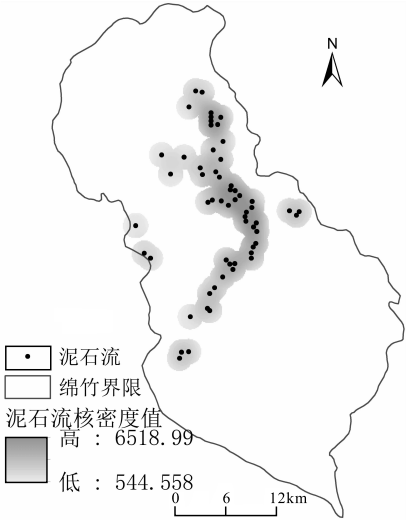


图 21 泥石流点核密度图

Fig. 21 Kernel density of Debris flow points

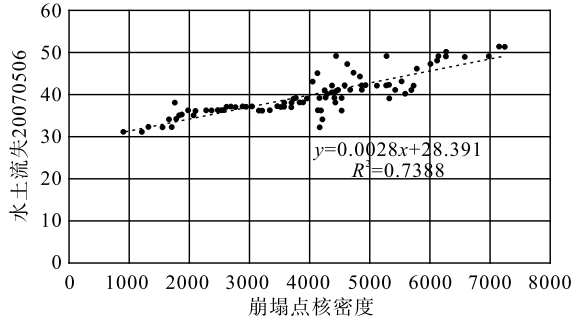


图22 崩塌点核密度与水土流失相关性图(2007.05.06)

Fig. 22 Correlation between collapse kernel density and soil erosion (2007.05.06)

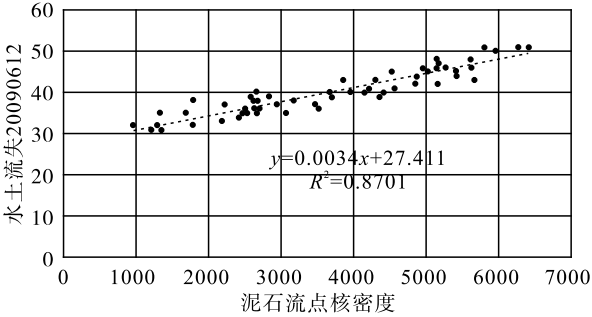


图 23 泥石流点核密度与水土流失相关性

Fig. 23 Correlation between Debris flow kernel density and soil erosion(2009.06.12)

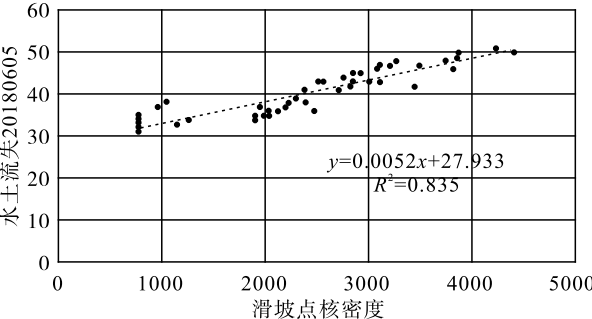


图 24 滑坡点核密度与水土流失相关性(2018.06.05)

Fig. 24 Correlation between Debris flow kernel density and soil erosion(2018.06.05)

(2)因研究区耕地损毁严重,震后城市化进程也占用一部分耕地。建议将研究区中部地势相对平缓的林地进行耕作活动,以增加耕地面积。

(3)研究区泥石流对建设用地影响较大,所以需加强排水设施建设。灾后恢复时可将靠近泥石流灾点的建筑搬迁到南部地势较为平坦的区域。在陡坡坡面设置护坡,既能涵养水源,也可减弱泥石流发生。

6 结论

土地是人类赖以生存的宝贵资源,研究地质灾害的土地利用响应机制对灾后土地合理利用具有重要意义。笔者以遥感和 GIS 手段相结合,对绵竹市 2007~2018 年间地质灾害引发的土地利用响应机制进行多尺度定量分析,得到以下结论。

(1)地质灾害分布。研究区崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害主要分布在地震烈度等级高、高程为 600~3 000 m 的中高地形及坡度为 20°~60°的中高

坡度区域。地震期间中高和高沟壑密度区域土地破坏最为严重,震后得到了有利地恢复。沟壑密度对地质灾害的影响程度:泥石流>崩塌>滑坡。

(2)宏观响应分析。汶川地震导致林地、耕地、建设用地大幅度减少,未利用地增加。随着震后重建及城镇化进程,耕地与未利用地多转化为建设用地和道路。地震期间、震后恢复、总体时段年综合土地利用动态度分别为 1.19%、0.36%、0.11%。3 期土地利用综合程度指数分别为 249.64、243.06、251.49。地震期间耕地、建设用地、林地转化为未利用的灾毁土地,土地利用程度也就处于衰退的趋势。震后随着城市建设、交通用地的增加,土地利用程度总体增强。地震烈度的土地利用响应程度依次为:建设用地>林地>耕地。崩塌、滑坡影响程度:林地>耕地>建设用地;泥石流影响程度:林地>耕地>建设用地>道路。地质灾害导致地震期间水土流失加剧,震后逐渐恢复。2007 年震前轻度和中度流失区域灾害点分布频度高;2009 年震后减少;2018 年经过恢复呈“涨势”。震前剧烈、极强和强度水土流失地灾点频度较低,2009 年震后增加;2018 年经过恢复频度呈“落势”。

(3)微观响应分析。微观缓冲区崩塌、滑坡、泥石流等引发土地利用响应程度:林地>耕地>建设用地;年综合动态度:地震期间>震后恢复阶段>整体时段;响应速度:泥石流>滑坡>崩塌。耕地、林地受滑坡影响最强烈,建筑损毁受泥石流影响最大。地震期间滑坡地区土地利用响应速度最快,泥石流区响应程度最强。地质灾害点缓冲区范围的土地利用结构、幅度、速度、程度响应均高于整个绵竹市区。地震期间耕地对滑坡敏感性增强;林地对崩塌、滑坡、泥石流敏感性减弱;建设用地对滑坡敏感性增强,泥石流敏感性减弱。耕地和林地对地质灾害敏感性最强。地灾点核密度与水土流失呈线性正相关。

(4)对绵竹市灾后土地合理利用及地质灾害防治提出合理建议。例如,坡地改梯田、建立农田防护林、加强排水设施建设、损毁耕地异地置换等。

参考文献(References):

谭梦. 地质灾害对土地利用的影响研究[D]. 南京:南京大学,2013.

TAN Meng. Research on the impact of geological hazard on land use in China[D]. Naging:Naging University,2013.

李磊,张延星,张博阳. 地震前后景观格局的变化研究——以四川都江堰地区为例[J]. 地震工程学报,2019,41(5): 1361-1366.

LI Lei, ZHANG Yanxing, ZHANG Boyang. Change in Landscape Pattern before and after an Earthquake : A Case Study of Dujiangyan Area, Sichuan Province[J]. China Earthquake Enginengineering Journal, 2019, 41(5): 1361-1366.

彭义. 基于地震次生地质灾害影响下的土地利用结构优化研究[D]. 成都:四川师范大学,2014.

PENG Yi. Research on Structure Optimization of Land use upon the Influence of an Earthquake induced Secondary Disasters[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2014.

曹慧. 基于 RS 与 GIS 的土地利用与地质灾害相关性分析 [D]. 成都:成都理工大学,2007.

CAO Hui. The relevancy analysis of land-use and geological hazard based on RS and GIS [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2007.

刘惠敏,张业成,高庆华. 论土地资源与地质灾害的双重属性与发展态势[J]. 地质力学学报,2001(04):371-376+334.

LIU Huimin, ZHANG Yecheng, GAO Qinghua. Research on the Dual Attributes and Development Trend of Land Resources and Geological disasters[J]. Journal of Geomechanics, 2001(04):371-376+334.

刘纪远,布和敖斯尔. 中国土地利用变化现代过程时空特征的研究——基于卫星遥感数据[J]. 第四纪研究,2000, 20(03):229-239.

LIU Jiyuan, Buheaosier. Study on Spatial-temporal Feature of Modern Land-use Change in China: Using remote sensing techniques[J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(3): 229-239.

李璇琮. 基于 RS 和 GIS 的土地利用变化动态监测研究——以都江堰市为例 [D]. 成都:成都理工,2010.

LI Xuanqiong. Research on Dynamic Monitoring of Land Use Change Based on RS and GIS -TakeThe City Of Dujiangyan As Example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2010.

李璇琮. 都江堰土地利用变化动态监测研究[J]. 地理空间信息,2015,13(5):131-134.

LI Xuanqiong. Study on Dynamic Monitoring of Land-use Change in Dujiangyan [J]. Geospatial Information, 2015,13(5):131-134.

李鹏杰,何政伟,李璇琮. 基于 RS 和 GIS 的土地利用/覆被

- 动态变化监测—以九龙县为例[J]. 水土保持研究, 2012(2):38-43.
- LI Pengjie, HE Zhengwei, LI Xuanqiong. Dynamic Monitoring on Land Utilization/Land Coverage in Kowloon County Based on RS and GIS[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012(2):38-43.
- 魏巍. 新疆吉木萨尔县土地利用变化及驱动力研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2012
- WEI Wei. Study on Changes and its Driving Forces in JIM-SAR County[D]. Urumqi:Xinjiang Agricultural University, 2012.
- 金雄兵, 濮励杰, 等. 县级尺度土地利用与土地覆盖变化初步研究[J]. 土壤, 2003(06):204-210.
- JIN Xiongbing, PU Lijie. Land Use and Land Cover Change at County level [J]. Soils, 2003(06):204-210.
- 李璇琼, 何政伟, 龙晓君, 等. 甘孜州九龙县水土流失评价研究[J]. 测绘科学, 2012(6):62-65.
- LI Xuanqiong, HE Zhengwei, LONG Xiaojun, et al. Evaluation of Soil Erosion Based on GA-BP model[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012(6):62-65.
- 杨德生. 重庆市渝北区地表景观格局时空演化及生态环境响应[D]. 成都:成都理工大学, 2011.
- YANG Desheng. Landscape Spatial-Temporal Evolution and Ecological Environment Response in Chongqing Yubei District [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- 何易平, 马泽忠, 谢洪. 长江上游地区不同土地利用方式对山地灾害的敏感性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2005(04):528-533.
- HE Yiping, MA Zezhong, XIE Hong, et al. Mountain Hazards Integrated Sensitivity on Landuse of the Upper Reaches of Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005(04):528-533.
- 陈和平, 王深法, 胡先松. 浙江突发性山地水土灾害与土地利用类型的相关性研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2002, 28(01):91-95.
- CHEN Heping, WANG Shenfa, HU Xiansong. Study on the Relationship Between Water and Soil Disasters and Land Use[J]. Journal of Zhejiang University, 2002, 28(1): 89-93.
- 吴常润, 赵冬梅, 刘澄静, 等. 基于 GIS 和信息量模型的陇川县滑坡易发性评价[J]. 西北地质, 2020, 53(02):308-319.
- WU Changrun, ZHAO Dongmei, LIU chengjing, et al. Landslide Susceptibility Assessment of Longchuan County Based on GIS and Information Value Model[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(02):308-319.
- 仲佳鑫, 倪万魁, 黄玮. 宁夏贺兰山区郑官沟水石流发育特征与形成机理研究[J]. 西北地质, 2018, 51(3):223-231.
- ZHONG Jiaxin, NI Wankui, HUANG Wei. Research on Development Characteristics and Mechanism of the Zhengguangou Debris Flow in Helan Mountain of Ningxia[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(3):223-231.
- Burby R. J, R. E. Deyle, D. R. Godschalk, et al. Creating Hazard Resilient Communities Through Land-use Planning[J]. Natural Hazards Review, 2000, 1(2):99-106.
- Smith, S. M. The land use Guidance System: A Disaster Mitigation Tool for Rural Communities [J]. Emergency Management, 2001, 1(1):39-48.
- D. H. Bell, J. R. Pettinga. Engineering Geology and Subdivision Planning in New Zealand [J]. Engineering Geology, 1985, 22(1):45-49.
- Abuk, A. A Proposal for a Method to Establish Natural-Hazard-Based Land-Use Planning: the Adapazar Y Case Study [J]. Turkish Journal of Earth Sciences, 2001(10):143-152.
- Dai, F. C., C. F. Lee., X. H. Zhang. GIS-based Geo-environmental Evaluation for Urban land-Use Planning: A Case Study [J]. Engineering Geology, 2001, 61:257-271.
- Michael J Crozier. Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach[M]//Thomas Glade, Malcolm Anderson, Michael J Crozier. Landslide Hazard and Risk, John Wiley & Sons, Ltd., 2004:1-40.