

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.03.030

“5·12”汶川地震中都江堰生态恢复

程婷婷, 辜彬

(四川大学生命科学学院 生物资源与生态环境教育部重点实验室, 成都 610065)

摘要: 本研究综合考虑高程、坡度等地形因素及生物多样性、水源涵养等生态系统服务功能因素, 全面、快速评价灾后生态系统恢复效果, 探索地震灾后生态恢复评价新方法. 以“5·12”汶川地震中都江堰生态恢复为例, 综合地震及次生灾害引发的关键生态问题, 建立关键性生态用地空间格局. 结果表明: 与2005年相比2011年生态用地总面积减少12.88 km², 地震前后土地利用类型均有明显的向建筑用地转移的现象, 关键性生态用地重要性变化率为地质灾害>水源涵养>生物多样性. 从结果分析看, 震后第三年, 生物多样性、水源涵养、地质灾害指标多已恢复并且超过地震前, 损失部分多都在都江堰西北区, 该区滑坡、泥石流等发生频繁.

关键词: 地形因素; 生态系统服务功能因素; 地震灾后生态恢复

中图分类号: X171.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0491-6756(2019)03-0563-10

Study on ecological restoration of Dujiangyan after “5·12” Wenchuan earthquake

CHENG Ting-Ting, GU Bin

(Key Laboratory of Bio-Resource and Eco-Environment of Ministry of Education,
College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This study comprehensively considers topographic factors such as elevation, slope, ecosystem service factors, biodiversity and water conservation, to comprehensively and quickly evaluate the recovery effect of post-disaster ecosystems and explore new methods for ecological restoration assessment after earthquakes. Taking the ecological restoration of Dujiangyan in the “5.12” Wenchuan earthquake as an example, the key ecological problems caused by earthquakes and secondary disasters were integrated, and the spatial pattern of key ecological land was established. The results show that compared with 2005, the total area of ecological land decreased by 12.88 km² in 2011. The land use types before and after the earthquake have an obvious transfer to construction land. The importance of key ecological land use rate is geological disaster>water conservation>Diversity. From the results analysis, in the third year after the earthquake, the indicators of biodiversity, water conservation, and geological disasters have been restored and exceeded the pre-earthquake. Most of the losses are in the northwest of Dujiangyan, where landslides and mudslides occur frequently.

Keywords: Topographic factors; Ecosystem service function factors; Ecological restoration after earthquake

收稿日期: 2018-06-11

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2015BAC05B05)

作者简介: 程婷婷(1992-), 女, 安徽宿州人, 硕士研究生, 研究方向为生态工程理论研究. E-mail: 2714974089@qq.com

通讯作者: 辜彬. E-mail: amakusa@126.com

1 引言

我国地处欧亚板块交界处,地震发生频率大。地震不仅本身具有破坏,还会诱发一系列次生灾害如,崩塌、滑坡、泥石流等,这些灾害对生态环境造成巨大破坏,如栖息地的丧失和退化、生物多样性的丧失、生态平衡的破坏等,对区域生态安全构成巨大威胁。

关于地震灾害国内外已有许多研究,多数研究分析地震对灾区的破坏,如地震强烈程度与植被破坏度之间的关系^[1],或滑坡、泥石流等次生灾害的发生机理与预防机制^[2-4]。对于地震灾后恢复研究大多趋向于单一因素的分析,如植被在地震前后的动态变化^[5]、土地利用变化在地震前后面临的形式^[6]等,少部分研究从生态系统视角出发,如从农田、森林、草地等生态系统角度考虑^[7]。整体而言,地震灾后恢复研究停留在单一因素、或生态系统视角的分析中,但目前并没有将单因素分析与生态系统分析相结合的研究,对于灾区生态用地管理缺乏全面、系统的理论基础。

生态用地是指除生产和建设用地外,具有重要生态服务功能的区域和空间,包括耕地、林地、草地、水面等,是稳定人类社会发展的基础^[8],所谓关键性生态用地则是指具有重要的生态系统服务能力,对维护关键性生态过程具有重要意义的土地单元及空间^[9],为保障生物多样性安全、水资源安全、游憩安全、地质安全等,需识别、评价、维护关键性用地空间^[9]。近年来关键性生态用地的研究主要集中在关键性生态用地的空间划定及识别^[9,11-13]、生态安全格局的构建^[14]等方面,为区域可持续发展提供指导意见。

本研究以都江堰为例,甄别出地震及次生灾害引发的关键生态问题,聚焦其背后的生态系统格局与功能,围绕生物多样性、水源涵养等生态系统服务功能因素,结合都江堰坡度、高程等地形因素识别灾区关键性生态用地,评价灾后生态恢复效果,以期都为都江堰灾后土地生态管理提供指导,为地震灾后恢复研究提供新的研究视角。

2 材料与方法

2.1 材料

2.1.1 研究区概况 都江堰市位于四川盆地成都平原西北边缘,地处岷江出山口,距离省会成都市

40 km,介于北纬 30°44'54"~31°22'35"之间,东经 103°25'42"~103°47'0"之间,面积为 1207.5 km²。市境内地貌差异显著,东部为平原区,北部为中高山区,西南部为低山丘陵区,地势自西至东为从高山、中山到低山再到平原逐级降低,海拔为 592~4582 m,相对高差 3900 m。都江堰市属于四川盆地亚热带湿润季风气候。多年最冷月平均气温 4.6℃,最热月平均气温 24.4℃。平均年降雨量为 1243.80 mm,雨量年内分配不均,年际变化不大。同时都江堰市地处横断山北段川西高山峡谷这一世界生物多样性关键区域内,地质构造复杂,生物种类繁多,水资源丰富。“5·12”汶川地震中都江堰属极重灾区,受到地震、崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害,灾害点密度高达 13.4 个/km²^[21],是汶川震区灾害密度最大的地区之一。

2.1.2 数据来源 影像数据来源为 Landsat TM 地震前三年和后三年,分辨率为 30 m×30 m,云量在 10%以内。土地利用数据采用都江堰市 2005 年、2011 年土地利用现状及国土资源调查及年度变更调查数据。2008 年地震灾后土地利用数据来源于《2009 成都年鉴》。对土地利用类型进行判定和分析,划分出森林生态系统、湿地生态系统、草地生态系统、农田生态系统、城市生态系统、其它生态系统六类。其中森林生态系统包括林地,湿地生态系统包括河渠、湖泊、水库/坑塘,草地生态系统即为草地,农田生态系统包括耕地、水田和园地,城市生态系统包括城镇、农村居民点、交通和采矿用地,其它生态系统包括裸地和未利用土地。

2.1.3 关键性生态用地 “5·12”汶川地震的发生直接导致坡度、高程、植被面积、水域面积等的改变,对上述因素的研究只能从某一角度考虑生态恢复情况,本文选取生物多样性、水源涵养、地质灾害三因素作为关键性生态用地衡量指标,既包含与地震相关的直接因素又从宏观角度全面考虑生态恢复效果。

2.2 研究方法

西南山地生态环境相对脆弱,生态系统结构、功能稳定性对于生态安全具有重要意义^[14-16]。本研究根据地震灾后产生的关键生态问题,如植被破坏、土壤流失、山体破碎、湖泊堵塞等,基于景观生态学理论及 GIS 空间分析、叠加分析等技术,从地质灾害、生物多样性和水源涵养三方面构建灾后生态用地重要性等级,其中地质灾害包括高程、坡度、

人类活动强度,每一因素的重要性分级均采用自然断裂法获取,分为一级重要、二级重要、三级重要、四级重要和五级重要 5 个等级,再将地质灾害、生物多样性和水源涵养三方面等权叠加得到最终的生态用地空间分布图,然后通过条件逻辑识别结构识别关键性生态用地空间分布,分析不同因素重要性等级变化背后的灾后生态治理恢复效果。

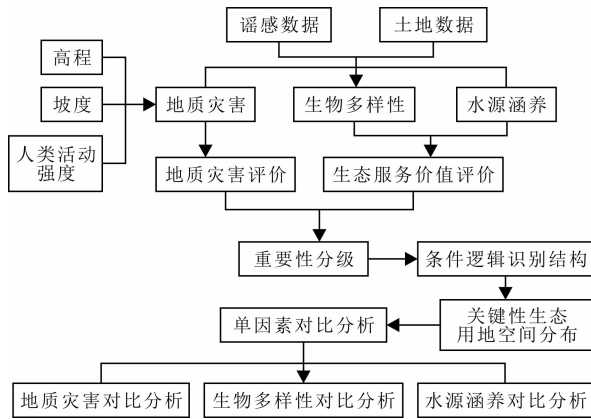


图 1 方法模型
Fig. 1 Method model

2.2.1 土地利用分类 土地因具有不同的功能而分成不同土地类型,都江堰地形跨度大,由高原至平原不等,土地利用类型多样. 根据土地利用现状分类标准(GB/T21010-2007),结合生态用地分类研究^[13],将 27 个二级土地利用类型归为 10 个一级土地利用类型,如表所示:

2.2.2 生物多样性重要性评价 生物多样性生态用地是指保护区域生物栖息地和生态系统的完整性和健康性的生态空间,一般而言,生态系统生物多样性服务功能高的地方能为濒危物种提供良好生境,即相应生态系统安全等级越高. 参考谢高地等人的生物多样性服务价值当量^[17],结合类似西南地区研究,考虑都江堰实际地质地貌及规划建设情况,制定都江堰生物多样性服务价值当量表(表 2),其中园地、公共管理与公共服务用地生物多样性服务价值当量为森林和草地平均值;工矿仓储用地、交通运输用地、城镇村及工矿用地生物多样性服务价值当量为农田和荒漠平均值. 依据研究区不同土地利用类型计算出各评价单元生物多样性服务价值,并予以修正,计算公式:

$$S = l \times n \times m$$

式中, S 为生物多样性服务价值, l 为土地利用类型, n 为生物多样性当量, m 为保护级别. 参考相

关文献研究^[16,18],考虑实际各因子与生态环境之间的关系,

表 1 都江堰 2005、2011 年土地利用分类表(km²)
Tab. 1 Dujiangyan land use classification table for 2005 and 2011 (km²)

一级	二级	2005 年	2011 年
耕地	水田	175.8419	160.2412
	水浇地	114.5662	103.8623
	旱地	37.3935	39.5691
园地	果园	16.0222	16.6595
	茶园	1.8948	1.7589
	其它园地	28.5770	23.3247
	有林地	581.7249	572.9754
林地	灌木林地	2.0840	2.1084
	其它林地	8.2586	8.2243
	荒地	0.6812	0.7405
工矿仓储用地	采矿用地	0.5612	3.1273
公共管理与公共服务用地	风景名胜设施用地	18.7367	5.8227
	公路用地	3.5969	4.2219
交通运输用地	农村道路	0.2597	5.3030
	铁路用地	0.3342	1.0228
	河流水面	19.7509	19.6116
水域及水利设施用地	湖泊水面	0.4926	0.4388
	坑塘水面	2.4903	2.4275
	水工建筑用地	0.5655	0.5778
	水库水面	7.6086	7.6086
特殊用地	滩涂	1.4676	1.6565
	农村水利用地	1.2090	1.2505
	裸地	68.8677	69.4478
	设施农用地	0.7706	1.1135
城镇村及工矿用地	城市	23.8768	29.7284
	建制镇	26.0768	52.9811
	农村居民点	64.7282	72.6333

表 2 都江堰各生态系统生物多样性生态服务价值当量因子(yuan · hm⁻² · a⁻¹)

Tab. 2 Dujiangyan ecosystem biodiversity ecological service value equivalent factor (yuan · hm⁻² · a⁻¹)

土地利用类型	生物多样性	土地利用类型	生物多样性
耕地	628.2	交通运输用地	464.5
园地	1924.55	水域及水利设施用地	2203.3
林地	2884.6	其它用地	300.8
草地	964.5	城镇村及工矿用地	464.5
工矿仓储用地	464.5		
公共管理与公共服务用地	1924.55		

制定生物多样性分级赋值(表 3).

表 3 都江堰生物多样性分级赋值标准

Tab. 3 Dujiangyan Biodiversity Classification Assignment Criteria

生态系统类型	安全等级			
	一级	二级	三级	四级
森林生态系统	√			
湿地生态系统		√		
草地生态系统			√	
农田生态系统			√	
城市生态系统				√
其它生态系统				√
分级赋值	7	5	3	1

2.2.3 水源涵养重要性评价 水源涵养是水源安全的一个重要保障,可以起到调节径流,防止水、旱灾害等重要作用. 水源涵养的能力主要与土地利用类型、土层厚度、土壤理化性质有关,植被覆盖度越高,水源涵养能力越强,相应安全等级越高. 除参考不同生态系统的水源涵养能力外^[17],还需根据研究区实际水系分布情况、湖泊水库分布做调整. 园地、公共管理与公共服务用地水源涵养服务价值当量为森林和草地平均值;工矿仓储用地、交通运输用地、城镇村及工矿用地水源涵养服务价值当量为农田和荒漠平均值(表 4、表 5).

2.2.4 地质灾害重要性评价 地质灾害会破坏生态系统的结构,影响系统物质循环和能量流动,进而会影响生态功能的正常发挥. 地震及泥石流、滑坡、崩塌等都是都江堰常见地质灾害,地质灾害是自然动力与人类社会共同作用的结果,受到诸多驱

动因素的作用,本文地灾防护选取高程、坡度、人类活动强度 3 个因素. 基于前人研究成果^[11],结合都江堰地理情况,得到都江堰地质灾害评价指标及敏感性划分标准(表 6).

表 4 都江堰各生态系统水源涵养生态服务价值当量因子 (yuan · hm⁻² · a⁻¹)

Tab. 4 Ecosystem service value of water conservation in each ecosystem of Dujiangyan (yuan · hm⁻² · a⁻¹)

土地利用类型	生物多样性	土地利用类型	生物多样性
耕地	679.55	交通运输用地	278.7
园地	2085.22	水域及水利设施用地	23082.5
林地	3624.32	其它用地	26.5
草地	906.11	城镇村及工矿用地	278.7
工矿仓储用地	278.7		
公共管理与公共服务用地	2085.22		

表 5 都江堰水源涵养分级赋值标准

Tab. 5 Dujiangyan water conservation classification rating standard

不同植被类型和河流	安全等级			
	一级	二级	三级	四级
常绿林(阔叶林、针叶林、混交林)	√			
落叶阔叶林、经济林、针阔混交林		√		
灌丛、草地			√	
农田				√
河流、湖库	√			
河岸带、湖滨带		√		
分级赋值	7	5	3	1

表 6 都江堰地质灾害规避评价指标与敏感性分级标准

Tab. 6 Assessment criteria and sensitivity criteria for avoidance of geological disasters in Dujiangyan

因子	敏感性赋值					权重
	10	30	70	130	200	
坡度分级	5	4	3	2	1	0.49
高程	>2200	1800~2200	1300~1800	950~1300	950<	0.34
人类活动强度	工矿仓储用地、交通运输用地	城镇村及工矿用地、公共管理与公共服务用地	其它土地	园地、耕地	林地草地水域及水利设施用地	0.17

2.2.5 关键性生态用地识别 为明确表示关键性生态用地(CEL)空间分布及结构,对关键性生态用地重要性等级进行区分,目的是对研究区的空间发展提供一定空间导向,使城市生态建设趋向可持续发展. 以 CEL 综合评判为基础使用条件逻辑语句定义出关键性生态用地(CEL)条件逻辑识别结构(图 3).

图 3 是以关键性生态用地重要性评价为基础的,设置 CEL 为关键性生态用地标志变量,其值有

五种状态,分别是一级重要、二级重要、三级重要、四级重要、五级重要^[9],重要性分级方法采用 GIS 中的自然断裂法,cl 为关键性生态用地的指标度量. 以此为基础可以定义五种类型的 CEL 空间结构体,按照重要性等级由小到大的顺序依次为 CEL_A边缘生态用地(A 型)、CEL_B为过渡型生态用地(B 型)、CEL_C为辅助型生态用地(C 型)、CEL_D为缓冲型生态用地(D 型)、CEL_E为核心型生态用地(E 型). 以 CEL 元素重要性空间数据挖掘成果

为基础,通过图 3 模型处理就能够识别出 CEL 空间的具体分布结构与空间组合模式,进而为制定区域生态空间调控策略提供数据基础。

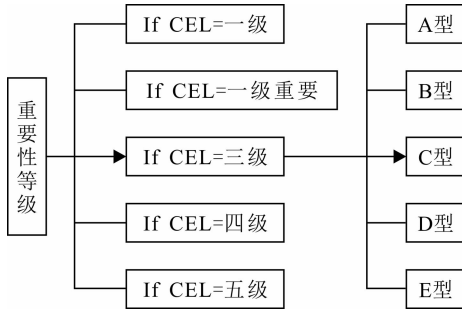


图 2 关键性生态用地条件逻辑识别结构
Fig. 2 Logical identification structure of key ecological land conditions

3 结果与分析

3.1 生态用地

2005 年都江堰生态用地面积为 741.69 km², 占总面积的 61.38%。主要集中在都江堰北部、西部和西南方向(图 3)。生态用地共 15 种类型,其中有林地最多,占 78%,依次为裸地占 9.28%、其它园地占 3.85%、河流水面占 2.66%、果园占 2.16%、其它林地占 1.11%、水库水面占 1.03%,茶园、灌木林地、荒草地、湖泊水面、坑塘水面、水工建筑用地、滩涂、农村水利用地占比均不到 1%。2011 年都江堰生态用地面积为 728.81 km², 占总面积的 43%,与 2005 年相比生态用地总面积减少 12.88 km², 体现在有林地和其它园地的减少。整体而言都江堰林地主要位于都江堰西部和北部高海拔地区,园地、草地主要位于都江堰市区周边,水系由岷江及其支流组成。

表 7 都江堰 2005、2008、2011 年生态用地类型面积(km²)
Tab. 7 Types of ecological land used by Dujiangyan in 2005, 2008, and 2011 (km²)

生态用地类型	年份		
	2005	2008	2011
园地	46.49	38.35	41.74
有林地	581.72	561.25	572.98
灌木林地	2.08	2.05	2.11
其它林地	8.26	8.21	8.22
荒草地	0.98	3.04	7.41
水域	32.37	29.27	32.32
特殊用地	70.08	65.43	70.70

结合 2008 年地震灾后生态用地数据(表 7)分

析知有林地、灌木林地、其它林地和园地面积在地震后均减少,受到不同程度的地震影响。都江堰西北山地丘陵区为林业、园地主要布局区域,其中虹口乡、龙池镇等区域为国家林业重点保护区。“5·12”汶川地震对都江堰龙池镇造成严重破坏,虹口—映秀断裂带也穿过虹口乡与龙池镇,而且该地区地质灾害发育,地形高差较大,容易形成泥石流,特别是在汶川地震后的 2008~2010 年发生多次泥石流,山体裸露,植被大面积破坏,植被覆盖度进一步降低。

水域面积 2008 年最低,且地震前和地震后变化率均超过 2%(表 8)。地震引发了大量的山体滑坡,由滑坡物质堵江造成的堰塞湖是一种典型的次生地质灾害。震发生后,白沙河上游河段无人区内两岸山体多处垮塌,堵塞河道。除此之外,长期暴雨导致河水上涨,也是水域面积增加的原因。

表 8 都江堰生态用地动态度

Tab. 8 Dynamic degree of ecological land use in Dujiangyan

生态用地类型	年份	
	2005~2008 年 变化率(%)	2008~2011 年 变化率(%)
园地	4.38	-2.2
有林地	0.88	-0.52
灌木林地	0.36	-0.73
其它林地	0.15	-0.03
荒草地	-52.55	-35.93
水域	2.39	-2.6
特殊用地	1.66	-2.01

荒草地在生态用地中占比较小,但年变化率最大。地震前变化率超过 50%,地震后变化率超过 35%。特殊用地变化率在 2%左右,2008 年前后面积均增加(表 8)。2005~2008 年间,耕地、园地有大面积转移现象,期间耕地、园地大面积转移为建筑用地,部分荒废为荒草地或转化为特殊用地,如裸地、特殊工程用地等。2008~2011 年为地震后恢复期,耕地仍然转化为建筑用地,部分林地、园地也发生转化,但面积不大。荒草地及特殊用地面积也随着城市建设的加快增长。

3.2 生态用地重要性分析

3.2.1 单因素生态用地重要性分析 2005 年都江堰生物多样性 A 型用地评价价值最大,占 29.96%,依次为 E 型用地占 26.85%,B 型用地占 24.6%,C 型用地占 9.65%,D 型用地占 8.94%(表 9)。2011 年都江堰生物多样性 A 型用地评价价值最大,占 31.34%,依次为 E 型用地占 27.78%,B 型用

地占21.7%,C型用地占10%,D型用地占9.25%(表10).E型用地分布在都江堰北部虹口乡国有林和龙池镇国家森林公园(图4a、图5a),该区域是都江堰市重点林区保护地,有高等植物3000多种,野生

动物资源200多种.A型用地主要分布在都江堰市区附近海拔较低的地方(图4a、图5a),该区域主要用于城市建设,动植物资源相对匮乏.

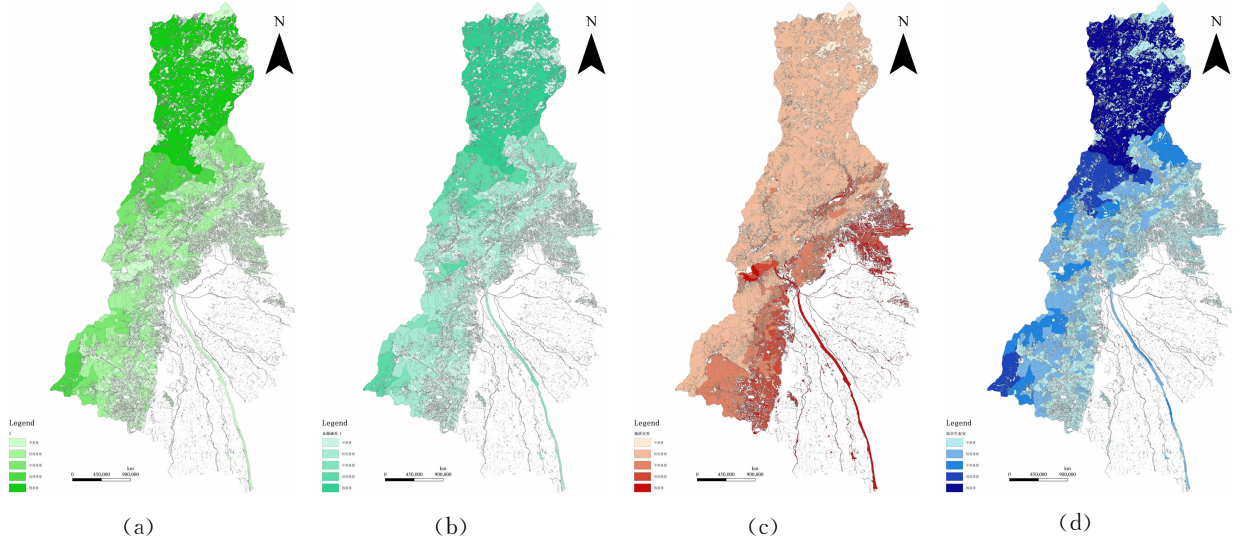


图3 2005年都江堰生物多样性(a)、水源涵养(b)、地质灾害(c)、综合生态用地(d)重要性分布

Fig. 3 Distribution of importance of biodiversity (a), water conservation (b), geological disaster (c) and comprehensive ecological land (d) in Dujiangyan in 2005

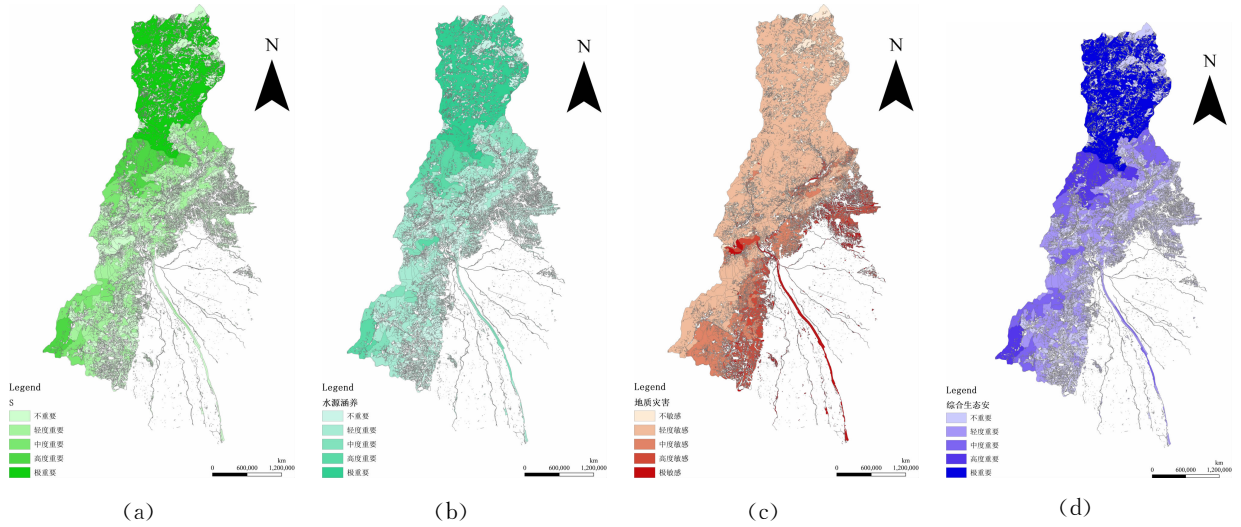


图4 2011年生物多样性(a)、水源涵养(b)、地质灾害(c)、综合生态用地(d)重要性分布

Fig. 4 Distribution of importance of biodiversity (a), water conservation (b), geological disaster (c) and comprehensive ecological land (d) in Dujiangyan in 2011

2005年都江堰水源涵养A型用地评价价值最大,占31.59%,依次为B型用地占25.98%,E型用地占21%,C型用地占11.99%,D型用地占9.45%(表9).2011年都江堰水源涵养A型用地评价价值最大,占32.23%,依次为B型用地占26.01%,E型用地占22.26%,C型用地占12.7%,D型用地占6.8%(表10).E型用地区分布在都江堰北部的虹口乡国有林和龙池镇国家森林公园;D型用

地区分布在虹口乡国营林场、龙池镇国家森林公园、黎明村、泰安村(图4b、图5b).该区有从汶川县进入都江堰的岷江干流,且岷江干流进行分区,其中岷江内流穿过都江堰市区进入成都市,该水系为成都平原重要水资源,具有水源涵养、洪水调蓄等重要功能,应严格加以保护,禁止任何开发建设活动.白沙河系岷江上游左岸一级支流,属都江堰市虹口乡至龙溪乡的国家级森林保护区,地震后白沙河流域

有多处堰塞湖形成, 堰塞湖的形成改变了原有水域

2005 年都江堰地质灾害重要性等级评价中, E 型用地占 61.14%, D 型用地占 17.44%, C 型用地占 14.6%, B 型用地 4.25%, A 型用地占 2.56% (表 9). 2011 年都江堰地质灾害重要性中, E 型用地占 47%, D 型用地占 21.82%, C 型用地占 19.86%, B 型用地 7.29%, A 型用地占 4.07% (表 10). 本文地质灾害重要性分析包括高程、坡度和人类活动强度三个因素. E 型用地多在都江堰市区及市区东南方向, 生态用地类型主要为水域、草地和林地, D 型用地和 C 型用地分布在非平原地区 (图 4c、图 5c). 在城市开发建设中应减少城市集中发展, 避免人类活动对自然的超负荷影响.

并存在潜在风险.

3.2.2 综合生态用地重要性分析 综合生态用地重要性由生物多样性、水源涵养和地质灾害三因素等权叠加得到. 2005 年综合生态用地 A 型用地占 31.67%, B 型用地占 24.25%, E 型用地占 23.89%, C 型用地占 12.23%, D 型用地占 7.96% (表 9). 2011 年综合生态用地 A 型用地占 30.9%, E 型用地占 24.37%, B 型用地占 23.76%, C 型用地占 12.84%, D 型用地占 8.12% (表 10). E 型用地分布在虹口乡国有林, D 型用地分布在虹口乡国营林场、龙池镇国家森林公园、泰安村 (图 4d、图 5d), 是成都平原的一道天然绿色屏障. 应严格加以保护, 并纳入禁止开发区, 严格任何开发建设活动.

表 9 2005 年各因子及综合关键性生态用地的重要性

Tab. 9 The importance of various factors and comprehensive key ecological lands in 2005

等级标准	评价因子			
	生物多样性(值/比例%)	水源涵养(值/比例%)	地质灾害(值/比例%)	综合生态用地(值/比例%)
一级重要	377765.11 / 29.96	640000.12 / 31.59	0.01 / 2.56	348699.66 / 31.67
二级重要	310128.80 / 24.6	526426.14 / 25.98	0.01 / 4.25	267014.00 / 24.25
三级重要	121596.64 / 9.65	242894.56 / 11.99	0.05 / 14.6	134604.60 / 12.23
四级重要	112734.02 / 8.94	191433.52 / 9.45	0.06 / 17.44	87586.59 / 7.96
五级重要	338496.43 / 26.85	425299.64 / 21	0.20 / 61.14	262988.46 / 23.89

表 10 2011 年各因子及综合关键性生态用地的重要性

Tab. 10 The importance of various factors and comprehensive key ecological lands in 2011

等级标准	评价因子			
	生物多样性(值/比例%)	水源涵养(值/比例%)	地质灾害(值/比例%)	综合生态用地(值/比例%)
一级重要	381990.59 / 31.34	615697.22 / 32.23	0.01 / 4.07	333454.30 / 30.9
二级重要	264476.85 / 21.7	496885.68 / 26.01	0.02 / 7.29	256363.68 / 23.76
三级重要	121117.85 / 10	242442.88 / 12.7	0.04 / 19.86	138661.01 / 12.84
四级重要	112798.05 / 9.25	129881.20 / 6.8	0.04 / 21.82	87636.34 / 8.12
五级重要	338496.43 / 27.78	425299.64 / 22.26	0.09 / 47	262988.46 / 24.37

3.2.3 生态用地重要性对比分析 地质灾害变化率最大, 各重要性等级变化率为 B 型 > A 型 > C 型 > D 型 > E 型 (表 11). 变化区域除在西北高原地区外, 更多集中在都江堰市区及都江堰水库附近 (图 4c、图 5c). “5·12”汶川地震后, 地质构造改变, 岩石松散, 为地质灾害提供充分的基础条件和动力条件, 所以都江堰 2008~2011 年泥石流大量爆发. 灾后重建中人类活动对生态环境的影响加重, 尤其是都江堰市区及郊区变化明显. 无论地震及次生灾害还是人类活动造成的影响多是不可逆的, 所以地质灾害 B 型、A 型变化率较大.

D 型, 从绝对值看 D 型变化量最大, 其次为 E 型 (表 11), 表现为 2011 年与 2005 年相比水源涵养的四级重要性等级占比减少, 五级重要性等级占比增长. 水源涵养五级重要区分布在湖泊、水库等区域, “5·12”汶川地震后的连续降雨及泥石流爆发形成的堰塞湖, 造成水源涵养五级重要区出现暂时性的增加. 水源涵养四级重要区分布在都江堰西北部的有林区 (图 4b、图 5b), 地质灾害包括地震、滑坡、崩塌、泥石流等造成地表岩石裸露、植被覆盖度降低, 水源涵养功能降低.

生物多样性变化率为 B 型 > A 型 > C 型 > D 型 > E 型, 其中 B 型变化率最大且为负值 (表 11),

水源涵养变化率为 E 型 > C 型 > A 型 > B 型 >

即 2011 年生物多样性二级重要性等级占比与 2005 年相比减小,其它重要性等级所占比例较小,但均表现为增加趋势.生物多样性变化表现在植被覆盖度的变化.“5·12”汶川地震灾后治理及时,都江堰环保局对重点生态保护区加强防护,一方面积

极恢复受灾坡面植被,一方面加强原有植被的保护,所以生物多样性五级重要和四级重要区域保持稳步恢复状态.地震后为快速恢复城镇化建设,一些边缘区植被用地适当改造为建设用地或其它用地,B型用地减少.

表 11 都江堰 2005、2011 年多因素关键性生态用地重要性变化率

Tab. 11 Dujiangyan's importance change rate of multi-factor critical ecological land in 2005 and 2011

因素	等级(百分比)	年份		总变化率(%)
		2005	2011	
生物多样性	一级重要 (A 型)	29.96	31.34	4.606142
	二级重要 (B 型)	24.6	21.7	-11.7886
	三级重要 (C 型)	9.65	10	3.626943
	四级重要 (D 型)	8.94	9.25	3.467562
	五级重要 (E 型)	26.85	27.78	3.463687
水源涵养	一级重要 (A 型)	31.59	32.23	2.025958
	二级重要 (B 型)	25.98	26.01	0.115473
	三级重要 (C 型)	11.99	12.7	5.921601
	四级重要 (D 型)	9.45	6.8	-28.0423
	五级重要 (E 型)	21	22.26	6
地质灾害	一级重要 (A 型)	2.56	4.07	58.98438
	二级重要 (B 型)	4.25	7.29	71.52941
	三级重要 (C 型)	14.6	19.86	36.0274
	四级重要 (D 型)	17.44	21.82	25.11468
	五级重要 (E 型)	61.14	47	-23.1272

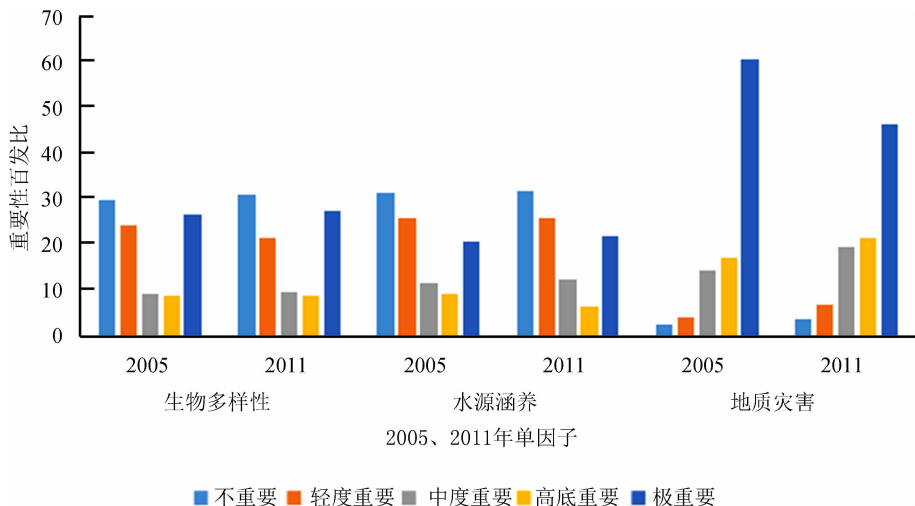


图 5 2005、2011 年生态用地重要性百分比
Fig. 5 The importance of ecological land in 2005 and 2011

整体而言,单因素变化率为地质灾害>水源涵养>生物多样性(表 11).都江堰素有“六山一水三分田”之说,地形从西到东表现为从高原到平原的过渡,起伏较大;水资源充足,具有世界著名水利工程,市内水域分支较多,灌溉面积广;西北地区有国家重点保护林,如:虹口乡国营林场、龙池镇国家森

林等.地震及崩塌、滑坡、泥石流等对都江堰地形及地质影响最为严重,表现为岩石崩塌、边坡裸露、坡体变形等.泥石流的大量爆发对水域影响较大,同时堰塞湖的形成也改变着水源涵养功能,地质灾害造成西北区林地覆盖度降低、多样性减少.

4 讨论

本文基于都江堰2008年“汶川”地震前、后三年两个时期的信息,并基于生物多样性、水源涵养、地质灾害,建立的生态用地重要性分布格局,分析了地震前、后土地利用、关键性生态用地变化特征。主要成果如下:

(1)2005年都江堰土地利用类型中有林地最多,依次为裸地、其它园地、河流、果园、其它林地、水库水面等,与2005年相比2011年生态用地总面积减少12.88 km²,主要是有林地和其它园地的减少。对比2008年灾后数据,2005年~2008年间耕地、园地大面积转移为建筑用地,部分荒废为荒地或转化为特殊用地。2008年~2011年为地震后恢复期,耕地仍然转化为建筑用地,部分林地、园地也发生转化,但面积不大。荒草地及特殊用地面积也随着城市建设的加快增长。

(2)2005年综合生态用地A型用地占比最大,依次为B型用地、E型用地、C型用地、D型用地。2011年综合生态用地A型用地占比最大,依次是E型用地、B型用地、C型用地、D型用地。整体而言,单因素变化率为地质灾害>水源涵养>生物多样性。从结果分析看,截止2011年为止,灾区生物多样性、水源涵养、地质灾害指标多已达到并且超过地震前,但也存在部分损失。从生物多样性角度分析,整体植被恢复效果良好,但植被覆盖度对地震灾害的响应存在滞后现象^[5]。水源涵养虽然部分降低,但整体水平较高,这与堰塞湖的形成^[19]及泥石流^[20,21]的发生有直接关系。地质灾害变化最大,地震破坏强度与高程和地形起伏度有直接关系,地震重灾区海拔高、地形起伏度比较大^[22],同时地震灾后恢复中人类活动起着重要影响作用,尤其是市区及其郊区的城市建设。

本研究采用GIS空间分析技术,将地形因素与生态系统服务功能因素综合考虑,全面评价灾后生态恢复效果。该研究方法可为地质灾害恢复研究提供新思路,对指导生态土地的管理和规划起到积极作用。

参考文献:

[1] 倪忠云,何政伟,赵银兵,等.汶川地震前后都江堰植被盖度变化的遥感研究[J].水土保持研究,2009,16:45.
[2] 孟华君,姜元俊,张树轩,等.汶川地震前后都江

堰山区滑坡滑动距离影响因素变化分析[J].地质力学学报,2017.
[3] 苟富刚,王运生,吴俊峰,等.都江堰庙坝地震高位滑坡特征与成因机理研究[J].工程地质学报,2012,20:21.
[4] 许冲,戴福初,徐锡伟.汶川地震滑坡灾害研究综述[J].地质论评,2010,56:860.
[5] 李京忠,曹明明,邱海军,等.汶川地震区灾后植被恢复时空过程及特征——以都江堰龙溪河流域为例[J].应用生态学报,2016,27:3479.
[6] 李喆,何政伟,许辉熙.地震前后都江堰市土地利用动态变化研究[J].四川师范大学学报:自然科学版,2012,35:412.
[7] 欧阳志云,徐卫华,王学志,等.汶川大地震对生态系统的影响[J].生态学报,2008,28:5801.
[8] 欧阳志云,李小马,徐卫华,等.北京市生态用地规划与管理对策[J].生态学报,2015,35:3778.
[9] 谢花林,李秀彬.基于GIS的区域关键性生态用地空间结构识别方法探讨[J].资源科学,2011,33:112.
[10] 周锐,王新军,苏海龙,等.平顶山新区生态用地的识别与安全格局构建[J].生态学报,2015,35:2003.
[11] 俞孔坚,王思思,李迪华,等.北京市生态安全格局及城市增长前景[J].生态学报,2009,29:1189.
[12] 于莉,李贝,崔海宁,等.区域关键性生态用地空间划定研究——以河北省青龙满族自治县为例[J].江苏农业科学,2017,45:279.
[13] 李益敏,丁扬,魏苏杭.基于GIS技术的县域生态用地重要性评价——以泸水县为例[J].中国农业资源与区划,2017,38:48.
[14] 彭建,郭小楠,胡熠娜,等.基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建——以云南省玉溪市为例[J].应用生态学报,2017,28:627.
[15] Peng J, Du Y, Liu Y, et al. How to assess urban development potential in mountain areas? An approach of ecological carrying capacity in the view of coupled human and natural systems[J]. Ecol Indic, 2016, 60: 1017.
[16] 杜悦悦,胡熠娜,杨旸,等.基于生态重要性和敏感性的西南山地生态安全格局构建——以云南省大理白族自治州为例[J].生态学报,2017,37:8241.
[17] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18:189.
[18] 储金龙,王佩,顾康康,等.山水型城市生态安全格局构建与建设用地开发策略[J].生态学报,

- 2016, 36: 7804.
- [19] 熊影, 李根生, 周宏伟, 等. 白沙河流域三座地震堰塞湖治理综述 [J]. 中国农村水利水电, 2013 (7): 118.
- [20] 李喆. RS 和 GIS 支持下地震灾区的生态安全评价——以都江堰市为例 [D]. 成都理工大学, 2009: 1.
- [21] 廖彬, 常鸣. 都江堰市龙池镇李泉太沟泥石流灾害研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2014(2): 102.
- [22] 张惠惠, 马煜, 张健楠, 等. 汶川强震区都江堰虹口小沟地震泥石流灾害调查研究 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2011, 38: 42.
- [23] 王庆安, 张翔, 毛竹. 汶川地震生态环境破坏严重区地形高程和起伏度分布特点 [J]. 科技导报, 2009, 27: 53.
- [21] 廖彬, 常鸣. 都江堰市龙池镇李泉太沟泥石流灾害

引用本文格式:

中文: 程婷婷, 辜彬. “5·12”汶川地震中都江堰生态恢复 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2019, 56: 563.

英文: Cheng T T, Gu B. Study on ecological restoration of Dujiangyan after “5·12”Wenchuan earthquake [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2019, 56: 563.