地震灾害对四川省区域生态系统危害及损失评价

于文金
（南京信息工程大学 大气科学学院，南京 210044）

摘要：地震是自然灾害中最为严重的一种，其带来的生态破坏灾难巨大，区域生态系统损害估算是目前研究中的难点问题之一。对我国西部地震的生态损失特点进行了研究，系统总结国内外地震灾害的生态系统损失评估成果，提出了西部地震生态损失评估模型：$E_q = E_D + E_{RC} + E_{RL}$，利用指数分析法和机会成本法等构建了地震研究的基本计算模型和理论，提出用地震生态损失量和地震生态损失灾害度相结合的办法来研究具体区域生态系统的地震灾害损失。利用模型计算，四川省在本次地震中森林碳汇储备能力每年损失 78.1 万 t，损失价值 2.5×10^8 元，森林释放氧气能力降低 67.38 万 t，损失价值 2.7×10^8 元。直接生态系统损失（E_D）647.58×10^8 元，生态系统恢复费用（E_{RC}）1158.31×10^8 元，全省森林生态系统生态服务价值损失达 1055.88×10^8 元，综合生态损失在 3527.31×10^8 元，灾度 0.38，属于明显灾害破坏。灾害损失和灾害度的快速评估对于指导灾后生态系统重建工作和生态系统工程的防灾都具有重要的积极作用。

关键词：地震；生态系统；灾害评估；汶川
文章编号：1000-0933(2008)12-5785-10 **中图分类号**：Q143 **文献标识码**：A

The harm and loss of ecosystem assessment of earthquake disaster in Sichuan Province

YU Wen-Jin
The Department of Oceanic Science, Collage of Atmospheric Science, Nanjing University of information Science & Technology, Nanjing 210044, *China*
***Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 5785 ~ 5794.**

Abstract: As one of the most serious natural disasters, earthquake normally brings huge ecosystem damage. But the quantitative assessment to this kind of ecosystem damage is relevant difficult. This paper studied the ecological characteristics of the earthquake losses in western China. After analysing the recent research of earthquake-caused ecosysteml losses assessment, an ecosystem loss assessment model for the western China earthquake is proposed in this paper: $E_q = E_D + E_{RC} + E_{RL}$, Index analysis and the opportunity cost method are used to build up the basic theory and calculation model of the earthquake study. A method of combining the earthquake ecological loss and the disaster degree of the earthquake ecological damage is proposed for the purpose of earthquake ecological damage estimation in certain regions. By using this model, the forest carbon reserve capacity in Sichuan Province gets an annual loss of 781,000t after the earthquake, which counts for the value loss up to 2.5×10^8 yuan, while the capability of forests releasing oxygen reduces 673,800t annually, with the value loss of 2.7×10^8 yuan. Direct ecosystem loss (ED) is 647.58×10^8 yuan, while ecosystem restoration cost (ERC) is 1158.31×10^8 yuan. The provincial forest ecological service value losses amounts to

基金项目：国家自然科学基金资助项目(40371048)；中国气象局软科学资助项目(QR2008-43)；南京信息大学人才启动资助项目(s8107324001)
收稿日期：2008-07-24；**修订日期**：2008-11-10
作者简介：于文金(1967 ~)，男，山东淄博人，博士，教授，主要从事区域经济开发与可持续发展研究. E-mail: yuwj@nuist.edu.cn
Foundation item: The project was financially supported by the Bational State Fund(No. 40371048), China's meteorological administeration soft science (No. QR2008-43) and Nanjing University of information and Engineering Progats to Start talent (No. s8107324001)
Received date: 2008-07-24; **Accepted date**: 2008-11-10
Biography: YU Wei-Jin, Ph. D., Professor, maninly engaged in reginal economic denelopment of economy and sustainable development. E-mail: yuwj@nuisf.edu.cn

1055.88 × 10^8 yuan. The integrated ecological damage is 3527.31 × 10^8 yuan, with the disaster degree being 0.38, sorted to the obvious disaster damage. The rapid assessment of the disaster losses and the disaster degree have important positive impact to guide post-disaster ecosystem reconstruction and ecological disaster prevention.

Key Words: earthquake; ecosystem; assessment of disaster; Wenchuan

在自然和人为因素的干扰下,生态环境破坏已成为全世界面临的一个严峻问题,生态系统结构和功能的保护已显得越来越重要。生态系统功能是指生态系统的自然过程和组分直接或间接地提供满足人类需要的产品和服务的能力。地震作为强烈的自然灾害活动对生态系统和生态功能的破坏有着重要的影响,正确评估其生态价值损失将影响政策的制定和管理措施的确定,从而影响生态系统的恢复与重建目标的选择。

国内外学者在不同空间尺度采用不同的方法对不同类型的生态系统进行了研究,推动了生态系统服务功能和价值评估理论与实践的广泛开展。Costanza 等 13 位科学家在《Nature》杂志上发表文章,对全球生态系统类型、服务功能进行了分类,同时计算出了全球各类型生态系统服务的平均价值。此后在生态系统功能价值的估算、动态模型建立和生态系统功能价值评估研究方面取得了一系列的进展[1~4]。地震是多种自然灾害中对生态破坏作用最强烈的灾害类型之一,这是由于地震的突发性和不可预测性所决定的,加之地震引发的系列次生灾害更加重了生态破坏的程度。目前,地震灾害的生态系统危害和损失评价研究比较少,尚处于起步阶段,主要集中在地震等级与区域损失的评估[5~10];我国关于地震的生态危害研究更少,基本属于定性的研究阶段。生态环境是人类生存、发展的基础,生态环境建设是经济发展的前提和保障,研究生态系统震害特征并采取有效的防御措施具有深远的意义。

1 研究区概况

四川素有"天府之国"的美誉,是中国西部的"门户"。全省面积 48.5 万 km^2,人口 8750 万,有 21 个市(州)、180 个县(县级市、区),是我国少数民族分布的集中区。本区从南到北跨越亚热带、暖温带和温带 3 个热量带,降水从 1 600 mm 向西北降至 250 mm 以下。地质构造复杂多变,地势起伏高差悬殊,区域分异变化明显,生态系统复杂,是我国重要的生态屏障和生态脆弱区。研究区处于世界著名的地震带:喜玛拉雅-地中海地震带上,地震频繁。

1.1 四川省生态系统的主要特征

中国西部的生态系统特征突出,主要表现为:

(1)生态环境复杂多样性 在全球的陆地生态系统中,除典型的赤道雨林和极地冰盖子系统外,受纬度带谱和垂直带谱影响,西部几乎涵盖了所有生态系统类型。有南端的热带雨林和北部的荒漠草原与荒漠,有低海拔的亚热带干河谷和高海拔的高山草甸与冻土冰川,有季风常绿阔叶林和内陆盐湖与泥沼。构成了类型齐全、复杂多样的生态环境。

(2)生物资源丰富多样性 西部地区生物种类繁多,其中植物种类占全国的 85%,从热带雨林到干旱荒漠的物种类型齐全,区系复杂。云南省有"植物王国"和"植物区系的摇篮"之称;四川的被子植物、蕨类植物种类之多居全国第二,裸子植物占全国第一。这一区域的动物种类多达 1 000 种以上,其中兽类近 200 种,占全国的 1/2,鸟类 776 种,为全国的 66%,爬行类和两栖类有 600 多种,鱼类 200 余种。大熊猫、金丝猴、羚牛等珍稀动物及水杉、银杏、杜仲、金钱等珍贵稀有药用植物为西部所特有。

(3)生态景观众多 西部有如陕西华山、四川九寨沟、云南西双版纳、天山天池等独特的自然生态景观,共有 179 个省级以上自然保护区。

1.2 5.12 震灾特征及其影响

我国西部地区处于世界著名地震带喜玛拉雅-地中海地震带,受印度洋板块不断北移的顶托,青藏高原不断隆起,西部地震频繁,而且较多破坏性大震。从表 1 可以看出我国近百年来的大地震共有 14 次,其中西部

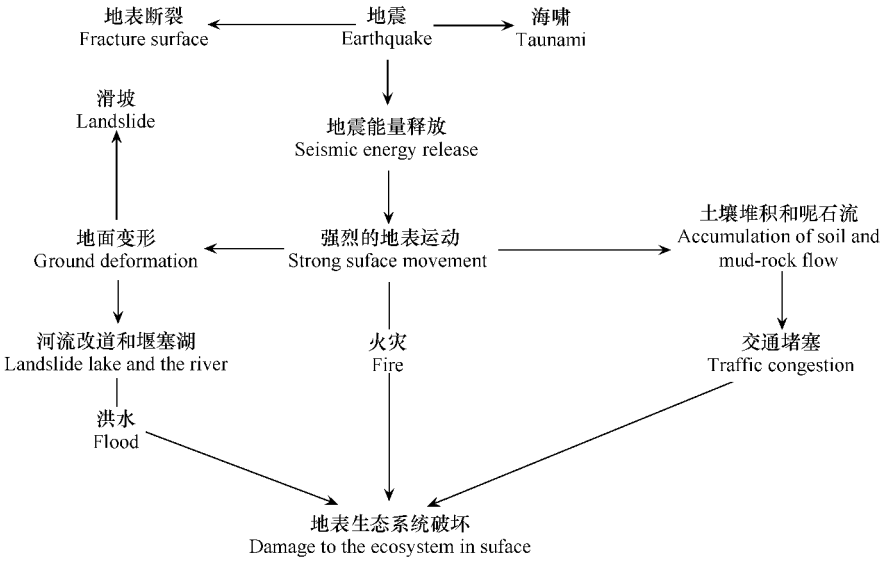

图 1　地震引起的伴生灾害与生态系统的关联模式

Fig. 1　Associated mode Caused by the earthquake disaster

地区就有 8 次,占总数的 57%,加之西部是我国重要的生态脆弱区,生态体系复杂,地震对生态系统及其生态功能的危害较大。另一方面,西部地区地形地貌复杂,山高谷深,是众多河流的发源地。地震引起的地质滑坡、泥石流、堰塞湖、火灾等伴生灾害多发(图 1),因此,地震衍生灾害对西部生态系统的影响也是不容忽视的。总体来看,西部生态系统震灾的特征有:受灾频度高、多大震、复合灾害影响严重、生态系统在地震灾害中损失大。2008 年 5 月 12 日的汶川大地震震级大,属于浅源地震,表现出地震强度大、持续时间长,破坏力强、灾区面广、经济损失惨重、地质灾害频繁和生态退化严重等突出特点。重灾区处于岷江、涪江以及嘉陵江上游地区,河流水系密布,地震严重破坏河流生态系统,显著增加泥沙与砾石输入,淤塞河道水库,抬高河床,破坏水体与水库容量,严重削弱区域防洪能力,加剧了本区及周边下游区域洪灾的威胁性。

表 1　1905 ~ 2008 年中国百年大地震

Table 1　the big earthquake in china from 1905 to 2008

时间 Time	震中地点 Site epicenter	震级 Magnitude	死亡人数(万人) Toll of death($\times 10^4$)
1920-12-16	宁夏海原县 Haiyuan county of Ningxian Province	8.5	24
1927-05-23	甘肃古浪县 Gulang county of Gansu Province	8.0	4
1962-12-25	甘肃昌马堡 Chanmabao county of Gansu Province	7.6	7
1933-08-25	四川茂县叠溪镇 Diexi town mao county Sichuan Province	7.5	2
1950-08-15	西藏察隅县 Chayu county Xizang Province	8.5	0.4
1966-03-08	河北邢台隆尧县 Longrao county xingtai city in Hebei Province	6.8	0.8064
1966-03-22	河北宁晋县 Ningjin county Hebei Province	7.2	
1970-01-05	云南通县 Tong county Yunnan Province	7.7	1.5621
1975-02-04	辽宁海城县 Haicheng county in Liaoning Province	7.3	0.1328
1976-07-28	河北唐山市 Tangshan city in Hebei Province	7.8	24.2
1988-11-06	云南澜沧县、耿马县 Lancing county and gengma county in Yunnan Province	7.6	0.0743
1999-09-21	台湾投南县集集镇 Jiji town tounan county in Taiwan Province	7.3	0.2378
2008-05-12	四川汶川 Wenchuan Sichuan Province	8.0	0.698

2　生态系统震灾损失评估方法

2.1　地震损失计算模型

S. Ergonul[11] 提出了地震损失计算公式:

$$FV_{\text{withoutEQ}} = -IC(P/p,i,n) - AE(F/A,i,n) + EV(F/A,i,n)$$

$$FV_{\text{withEQ}} = -IC(F/p,i,n) - AE(F/A,i,n) + EV(F/A,i,n) - SC(F/P,i,n) - RC(F/A,i,n)$$

这里 FV withoutEQ 是指在地震中没有表现出的未来的价值,FV 是指地震中表现出来的未来的价值。IC 是指城市各项设施建设的基本成本,AE 是指年消费支出,EV 是指每年的经济价值;SC 是指供应成本;RC 是指恢复期的每年恢复成本;$(F/P,i,n)$在一年折扣率 n 下,未来价值因子。

蒙特卡洛模拟的 3 个重要因素:①合理划分统计分布中的各类因素的花费,②各个组成分项成本的相关性,这是最难做到的;③数字的模拟运行。对数正态分布符合实际情况。

用三角形分布可以很好地说明最大价值和最小价值很好地分配给供应成本,回收成本和经济损失。

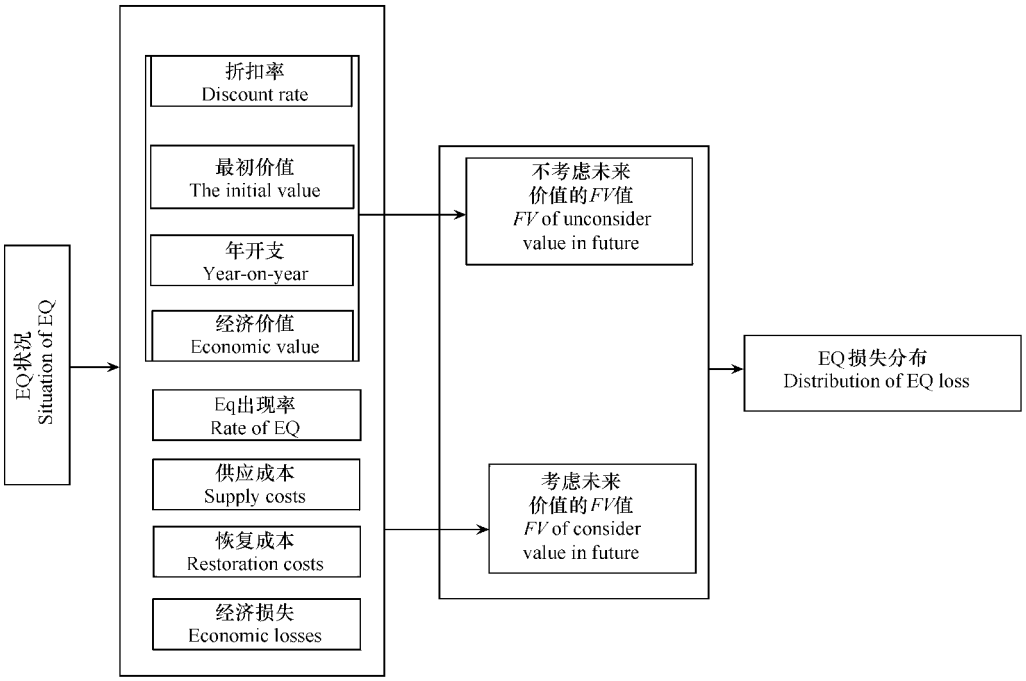

图 2 地震损失估算 Monte Carlo 模拟模型

Fig. 2 Monte Carlo Simulation model for earthquake loss estimation

该模型模拟的折扣率,初始成本,每年的支出,经济价值,供应成本,回收成本,经济损失和年发生地震概率。每个模拟计算考虑到未来价值,地震前后的未来价值。最后,要考虑到这两个价值地震损失估计的概率。

2.2 生态系统服务功能损失量估算

S. Ergonul 提出的地震损失模型是针对地震灾害损失恢复成本的,如果把它引入到生态系统的服务功能的恢复成本上则可以得到生态系统地震服务功能损失的估算公式,即设:A 为自然资源生态服务功能受损量的现值,T 为自然资源生态服务功能开始受损的时间点,X 为受损自然资源生态服务功能恢复到原有水平的时间点,σ_t 为 t 年受损自然资源提供生态服务功能的价值与原有水平的比值(亦称恢复函数,从 X 年起 σ_t 等于 1);Q_I 为受损自然资源的面积,ρ_t 为 t 年的贴现值[亦可表示为$(1+d)^{-(t-p)}$],d 为真实贴现率,P 为评估的当前时间点。

则有:

$$A = \sum_{t=T}^{x} W_t(1 - Q_t)Q_I\rho_t$$

设:D 为通过把其它种类的栖息地转换成受损自然资源而增加的生态服务功能的现值,H 为被转换栖息地开始转换的时间点,L 为通过转换其它种类的栖息地,使受损自然资源生态服务功能的增量与其受损量相等时的时间点,Q^R 为需要被转换的栖息地的面积,U_t 为 t 年被转换栖息地在未被转换成受损自然资源情况下

的价值,V_t 为完成转换后的栖息地具有的最大生态服务价值,φ_t 为 t 年被转换栖息地具有的生态服务价值和最大生态服务价值的比值(亦称成熟函数),在 M 年达到最大值。

$$D = Q^R \sum_{t=H}^{L} (V_t\varphi_t - U_t)\rho_t$$

令 $D = A$,得 Q^R 值,表示需要被转换的栖息地的面积,即补偿受损自然资源生态服务功能所需要的土地规模。

"中国生态系统生态服务价值当量因子表"是谢高地[12~14]等在 Costanza 等人提出的全球生态系统服务功能评价模型的基础上,对国内 200 多位生态学学者进行问卷调查,最后综合得出的。该表定义 1hm^2 全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值为 1,其它生态系统生态服务价值当量因子是指生态系统产生该生态服务相对于农田食物生产服务贡献的大小,本文用当量因子表示各类生态系统单位面积具有的生态服务功能水平。由于国内统计体系中,只有耕地面积的数据,本文以"耕地"替代表中的"农田"。

表 2 列出了森林、草地等 6 类生态系统从 A 到 I 共 9 项生态服务功能,分别为气体调节 A、气候调节 B、水源涵养 C、土壤形成与保护 D、废物处理 E、生物多样性维持 F、食物生产 G、原材料生产 H 和休闲娱乐 I。

表 2　中国生态系统服务价值当量因子(当量/hm^2)

Table 2　indicators of ecological systems service functions in China

项目 Item	A	B	C	D	E	F	G	H	I
森林 forest	3.50	2.70	3.20	3.90	1.31	3.26	0.010	2.60	1.28
草地 grassland	0.80	0.90	0.80	1.95	1.31	1.09	0.30	0.05	0.04
湿地 wetlands	1.80	17.10	15.50	1.71	18.18	2.50	0.30	0.07	5.55
水域 waters	0.00	0.46	20.38	0.01	18.18	2.49	0.10	0.01	4.34
农田 farmland	0.50	0.89	0.60	1.46	1.64	0.71	1.00	0.10	0.01
难利用土地 Difficult to use land	0.00	0.00	0.03	0.02	0.01	0.34	0.01	0.00	0.01

设:M_{ij}为 j 类生态系统 i 项生态服务功能的价值总当量,A_j 为 j 类生态系统的面积,e_{ij}为 j 类生态系统 i 项生态服务功能相对于农田生态系统提供生态服务单价(标准值)的当量因子。

则有:

$$M_{ij} = A_j e_{ij} (i = 1,2,\cdots,9; j = 1,2,\cdots,6)$$

2.3　地震生态损失植被指数法

植被归一化指数(the normalized difference vegetation index, *NDVI*)是植物监测最常用的方法[15]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

这里,*NIR* 指卫星接收的红外波辐射,*RED* 指卫星接收的可见光红色波辐射;当 *NDVI* 值较大,表示地平面较大的光和作用能力:

$$T(\%) = \frac{NDVI_c}{\max(NAVI_c) - \min(NDVI_c)} \times 100\%$$

VRR 是非常有用的指数,它可以快速估算反映植被的恢复覆盖条件和滑坡自然更新的能力。计算公式如下:

$$VRR(\%) = \frac{NDVI_2 - NDVI_1}{NDVI_0 - NDVI_1}$$

$NDVI_0$是指 NDV_I 的初始值,$NDVI_2$ 是指地震后的 *NDVI* 值,$NDVI_1$ 指标准化的 *NDVI* 值。如果 *VRR* 小于 0 则说明区域植被恢复条件脆弱,0 ~ 100 之间说明区域植被恢复能力强,大于 100 则表明区域植被优于地震前的植被覆盖。

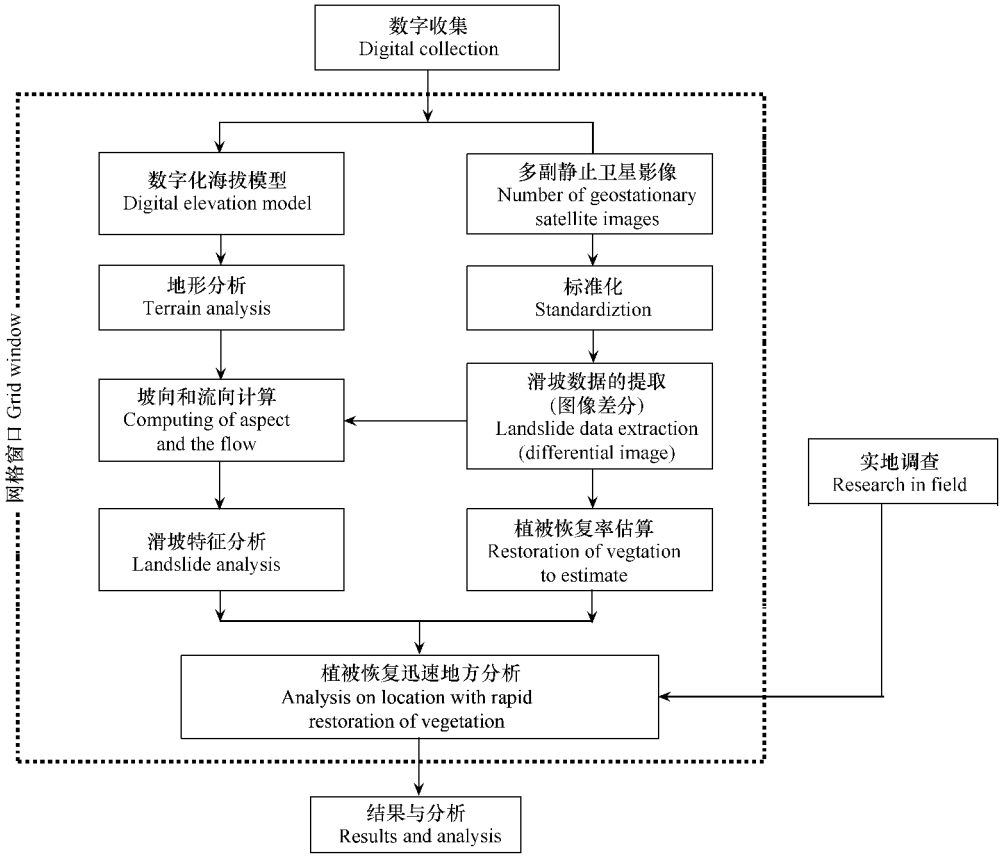

图3 坡地植被覆盖生态功能恢复估算

Fig. 3 Flowchart of vegetation recovery assessment at landsides

2.4 四川生态系统地震损失估算模型

生态系统的灾害损失评估方法很多,主要是市场价值法、条件价值法(CVM)、影子工程法、机会成本法等。研究对象主要集中在生态功能价值损失评估、生态受损量估算、快速地震生态价值损失估算、代表指标损失估算等。在实际研究中,单一的评估方法是难以奏效的,必须多方法结合。采用地理遥感信息系统中空间符合分析,研究区域生态变化特征和空间分布,通过实地勘察、野外定位考察,研究地震灾区生态系统损失强度,采用综合指标法建立生态系统损失快速评估模型,研究汶川地震灾害生态系统和功能损失及灾度。

在评估灾区灾前生态类型信息的提取过程中,采用 ERDAS Imagine9.0 软件对遥感数据进行正射校正,监督分类生成生态类型数据模版,在此基础上进行判读。灾害后的生态破坏信息提取过程中采用 Ecognition 软件提取目标多边形,人工修改图斑。生态系统地震损失评估模型的运算采用 SPSS10.0 和 Matlab6.0 软件。

研究表明[16,17],生态系统功能的损失与地震的强度和恢复期长短有关。随着地震恢复期的缩短,也就是说随着重建周期的缩短,地震的生态系统服务功能损失迅速减少。

地震的生态损失应该由 3 部分组成:区域生态直接灾害损失、受损生态系统恢复资金投入和恢复期生态系统生态服务功能的损失。根据 S. Ergonul 模型,结合我国西部生态的基本情况,对生态功能恢复损失率计算公式进行了改进,建立如下计算模型:

$$E_q = E_D + E_{RC} + E_{RL} \tag{2}$$

$$E_{RC} = A$$

$$A = \sum_{t=T}^{x} W_t (1 - Q_t) Q_1 \rho_t$$

$$E_{RL} = \sum_{t=0}^{t=T} \int_0^T (f(x))$$

其中,E_D 表示生态直接损失,E_{RC}表示生态系统恢复费用,E_{RL}表示生态系统恢复期生态服务功能损失。

鉴于生态系统服务功能和经济损失存在一定的量化难度,在研究中可以靠综合指标分析法计算地震生态灾害度 D,以此来衡量经济系统受灾害损失的严重情况。

首先选取指标,并确定各指标的各种权重指数,生态系统地震灾害损失指数计算模型:

$$CIISSEL = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} W_{ij} X_{ij}$$

其中,W_{ij}表示 i 类受灾体对区域 j 指标影响的权重,赋值范围[1,5]。X_{ij}表示 i 类受灾体对受损影响的分指标 j。综合指标法可以消除大量不确定因子的影响,把难以量化的因素做定量化研究。

标准化处理。为消除因数据量纲不同或数据悬殊过大导致的噪音影响,需要将它们都转化成无量纲数据,使其具有可比性。采用极差标准化方法对各个指标进行标准化处理,经过这种标准化所得的新数据,各要素的极大值为 1,极小值为 0,其余的数值均在 0 与 1 之间。

$$V'_i = \frac{V_i - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}}$$

式中,i 为年份,V'_i为标准化后的数据,V_i为各指标的原始数据值,$V_{\max}$、$V_{\min}$分别为该项指标的最大值和最小值。

本研究的置信度为 93%:

$$D = \frac{q}{g}$$

式中,D 代表灾度,q 为地震造成的生态系统损失,g 代表区域生态系统价值,用 D 来描述区域受灾影响深度更科学实用,研究结果在置信度 85% 上有效。

3　模型运作和结果分析

这次特大地震发生在青藏高原东缘龙门山断裂带,重灾面积达 10 万 km^2。四川、甘肃、陕西等受灾严重的地区,山高、谷深、坡陡,是中国滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害高发区。震前,国土资源部对受灾区域中的 41 个县地质灾害的隐患点进行过普查,查出地质灾害隐患点 4929 处,其中,特大型地质灾害隐患点 158 处、大型地质灾害隐患点 1271 处、中型地质灾害隐患点 1817 处,这些地质灾害的隐患点威胁着 94 万多人的安全(据国土资源部发布的调查资料)。汶川特大地震重灾区包括约 60 个县(市区),其中四川 50 个,甘肃 3 个,陕西 7 个,主要覆盖岷江、涪江、嘉陵江等的上游源区。重灾区由高山、中低山、丘陵以及山间平原等地貌类型组成,包括高山峡谷区、四川盆周山地、成都平原、川中丘陵以及秦巴山地等熟知的地理单元,区内景观及其组合类型多样,但山区生态脆弱性强,抗干扰能力弱,严重退化后恢复困难

汶川震区邛崃、岷山和秦岭山系,是中国森林资源的主要分布区之一,主震区所处的龙门山区,是四川省森林资源最为丰富的地区,该区域有林地占全省 10.4%,森林蓄积量占全省 9.5%,森林覆盖率比全省高 13 个百分点,林地占幅员面积的比重高出全省平均水平 17 个百分点,是长江上游水源林涵养区,也是天然林保护、退耕还林等重点工程实施区,森林面积大、蓄积量高,生态区位十分重要。根据对灾区已有资料[18-19]的统计,该区分布着维管束植物 4 600 种以上,苔藓植物 400 多种;脊椎动物 252 种,其中兽类 58 种,鸟类 64 种,爬行类 45 种,两栖类 54 种,鱼类 31 种。灾前不仅森林覆盖率高、植被类型丰富,而且保存较好。四川省地震灾区有主要以保护大熊猫、金丝猴等珍稀濒危动植物多样性及其自然生态系统为目标的自然保护区 51 个,保护着 263 个重要物种(昆虫除外),其中国家 1 级和 2 级保护动植物 60 余种,处于 IUCN 易危(VU)以上级别的有 80 余种。此外,灾区分布着 3 处世界遗产保护地——九寨沟黄龙自然遗产地、大熊猫栖息地自然遗产地以及都江堰青城山文化遗产地。四川卧龙、甘肃白水江、陕西佛坪 3 个国家级自然保护区,基础设施损失严重。地震使受灾区域山体大面积垮塌,森林植被毁损严重,四川省森林生态系统及珍稀野生动植物资源受到严重

破坏。通过卫星遥感数据、四川省地震局、四川师范大学地震考察课题组和地方政府地震资料统计,结合国家土地资源部的卫星遥感图片资料(图4)解译计算与实地调研,获取了地震前后震区森林、草地、沼泽、农田、难利用土地的面积变化,动物数量和种类的变化资料(表3,表4),遥感数据源包括 LandsatTM,SPOT,IKONOS,福卫和 IP6 卫星遥感数据,以及国土资源部公布的航空摄影数据;基础地理数据包括 DEM 数据(1:50000),乡镇边界,水土流失数据(1:100000),乡镇边界、交通和自然保护区矢量数据;野外调查数据与灾区社会经济数据。采用中国生态系统服务当量系数,数据标准化后代入模型,计算结果如表5。

表3 汶川地震灾区生态系统破坏遥感数据

Table 3 Ecosystems detroy area stitstic caused by earthquake in Wenchuan,Sichuan province

市县(区) Cities and counties (districts)	森林生态系统 Forest ecosystems			草地生态系统 Grassland ecosystems			农田生态系统 Agro-ecosystem			总计 Total		
	破坏面积 Damage area (hm^2)	总面积 Total area (hm^2)	所占比例 Percentage (%)	破坏面积 Damage area (hm^2)	总面积 Total area (hm^2)	所占比例 Percentage (%)	破坏面积 Damage area (hm^2)	总面积 Total area (hm^2)	所占比例 Percentage (%)	破坏面积 Damage area (hm^2)	总面积 Total area (hm^2)	所占比例 Percentage (%)
绵竹	5727.5	38771.8	14.77	3749.8	24122.5	15.54	239.9	56034.9	0.43	10047.3	125165.3	8.03
汶川	19295.1	162452.0	11.88	7141.6	175.581.74.07		288.5	2249.0	12.83	27236.0	408.217	6.67
安县	7587.7	52953.1	14.33	771.2	2901.2	26.58	489.8	79689.2	0.61	8888.4	140170.1	6.34
什邡	3169.6	27129.2	11.68	1619.7	11197.1	14.47	96.2	38595.5	0.25	5353.4	85356.7	6.27
彭州	4962.6	56562.1	8.77	1394.8	8679.3	16.07	115.6	68846.8	0.17	6669.3	141926.1	4.70
都江堰	2599.5	70715.4	3.68	440.5	9108.9	4.84	14.0	34543.9	0.04	3120.9	120168.4	2.60
北川	2991.4	190613.1	1.57	341.3	37292.7	0.92	2816.6	51686.5	5.45	6252.9	286341.2	2.18
青川	907.5	199106.0	0.46	448.8	41146.9	1.09	874.9	79047.1	1.11	2256.4	326228.7	0.69
茂县	1441.9	176179.6	0.82	670.2	135343.0	0.50	31.2	10398.1	0.30	2236.3	384806.0	0.58
平武	1156.5	418640.4	0.28	275.1	87179.2	0.32	1725.7	58871.0	2.93	3325.4	595627.5	0.56
文县	438.5	104299.8	0.42	2.3	57010.8	0.00	0.00	0.00	0.00	440.8	498894.4	0.09
崇庆	4.30	38246.9	0.01	6.10	6303.9	0.10	0.00	0.00	0.00	10.3	108830.3	0.01
理县	16.1	137362.2	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	35.4	432518.0	0.01
江油	10.8	121575.3	0.01	0.00	0.00	0.00	1.4	136581.5	0.00	12.2	271752.8	0.00
合计 Total	50309.0	1794606.9	2.80	16878.9	764830.1	2.21	6693.8	616534.5	1.09	75885.0	3925976.0	1.93

表4 汶川地震生态破坏统计资料

Table 4 Ecological damage statistics of Wanchuan earthquake

林地 Forest (hm^2)	草地 Gressland (hm^2)	沼泽 泽 Swamp (×万 km^2)	农田 Farmland (hm^2)	珍奇动物种类 Types of unusal animals	堰塞湖 Landslide Lake (hm^2)	泥石流 Mud -rock flow (×$10^8 m^3$)	生态景观覆盖率下降 Landscape Ecology drop coverage (%)	林区道路损坏 Road damage in in forest (km^2)	林区桥梁损坏(座) Forest damage to the bridge (Block)	种苗基地 Seed bast (hm^2)
50309.0	16878.9	7.3	6693.8	/	33491	42.96	2.09	3487	487	1600

表5 汶川地震造成的四川省生态系统经济损失

Table 5 ecologic economic loss of Sichuan province by Wenchuan earthquake

ED (×10^8)	ERC (×10^8)	ERL (×10^8)	沼泽生态服务价值 The value of ecosystem services of swamp (×10^8)	草地生态服务价值 The value of ecosystem services of grassland (×10^8)	森林生态服务价值 The value of ecosystem services of forest (×10^8)	综合生态损失 Integrated ecological damage (×10^8)	灾度 Disaster Degree (D)	灾害损失等级 Disaster loss level	置信度 Condience (%)	回归系数 Regression coefficient	τ 检验 τ-test
647.58	1158.31	1721.42	516.77	823.93	1055.88	3527.31	0.38	严重损失 Worst	85	0.93	6.32

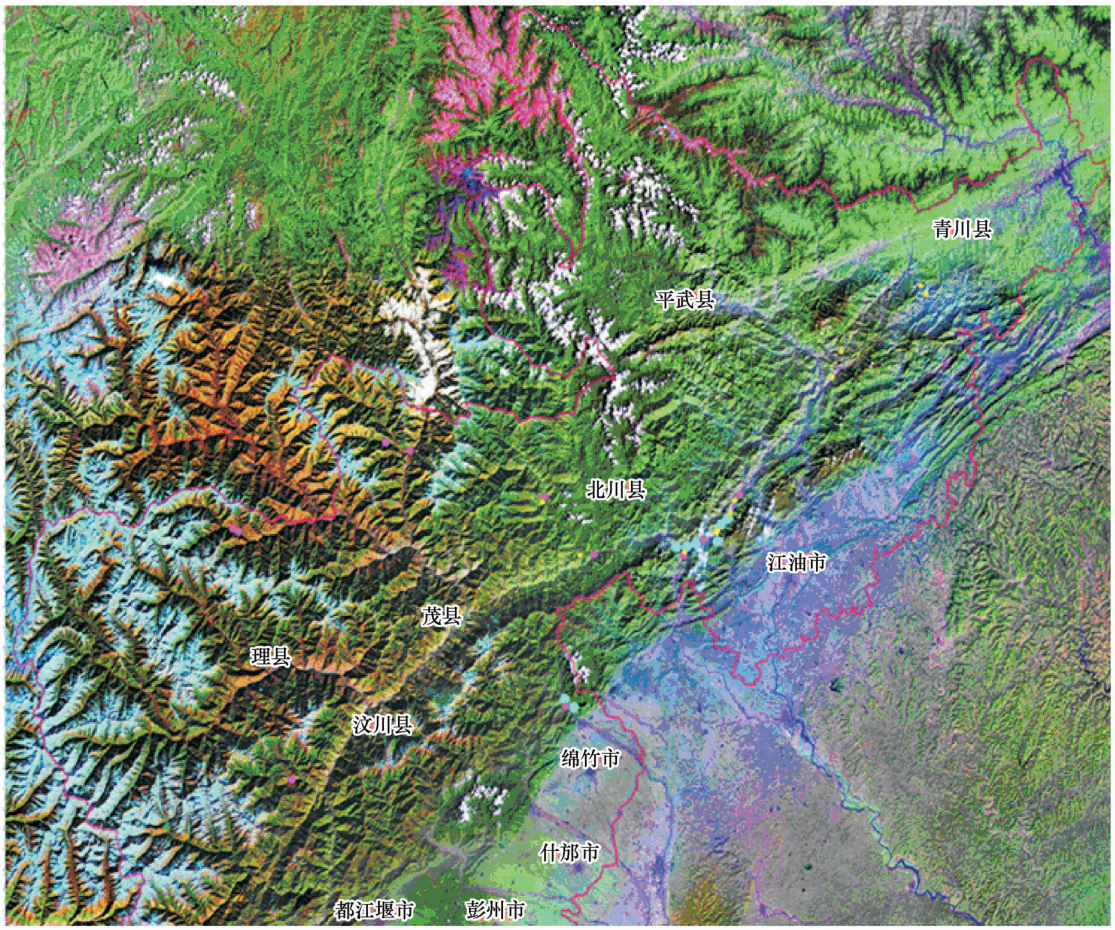

图 4　汶川重灾区遥感图

Fig. 4　The map of Wenchuan worst-hit remote-sensing

遥感监测结果表明,生态系统重灾区主要在龙门断裂带一线的山地区域,包括绵竹、汶川、安县、什邡 4 个县市。彭州、都江堰和北川 3 个县市生态破坏面积占区域总面积的 2%。与地震前相比,植被景观斑块明显减少而裸露景观斑块明显增多,裸露斑块形状一般沿山体顺坡方向呈不规则的三角型或条带性;而城镇村庄聚落为中心的乡村田园景观受到明显破坏,初步估计,新的救灾安置聚落景观上千处。植被景观退化及其空间格局演变带来比较明显的生态退化以及区域生态系统服务功能衰退,特别是主体功能(水源涵养、水土保持、生物多样性保护以及旅游景观服务功能等),一些自然保护区如卧龙、白水河、龙溪、蛎虹口的珍稀濒危物种关键栖息地也严重受损。景观质量退化是地震及地质灾害综合作用的结果。

从生态破坏种类上来看,林地损害面积最大,其次为沼泽、草地、农田。灾区泥石流堆积灾害迹地 3430km^2,堆积量达 42.96 ×10^{8}m^3。

根据初步测算,森林水源涵养功能降低 30.24 ×10^{8}t,水土流失潜在条件使将进入长江的泥沙达到 10.74 ×10^{8}m^3。四川省在本次地震中森林碳汇储备能力每年损失 78.1 万 t,损失价值 2.5 ×10^8 元,森林释放氧气能力降低 67.38 万 t,损失价值 2.7 ×10^8 元。直接生态系统损失(ED)647.58 ×10^8 元,生态系统恢复费用(ERC)1158.31 ×10^8 元,全省森林生态系统生态服务价值损失达 1055.88 ×10^8 元,综合生态损失在 3527.31 ×10^8 元,灾度 0.38,属于生态系统严重经济损失等级。

4　结论和建议

(1)地震等重大灾害的生态经济损失快速评估对指导震后区域生态功能的快速恢复和重建,针对性的防灾救灾,建立应对灾情的快速反应机制具有重要的作用。

(2)应用综合指数法和生态功能市场估值法能够快速地对地震造成的区域生态经济损失进行初步评估,多种方法综合利用可以取长补短,相互印证。

(3) 初步测算,四川省在本次地震中直接生态系统损失(ED)647.58 $\times 10^8$ 元,生态系统恢复费用(ERC)1158.31 $\times 10^8$ 元,全省森林生态系统生态服务价值损失达 1055.88 $\times 10^8$ 元,综合生态损失在 3527.31 $\times 10^8$ 元,灾度 0.38,属于生态系统严重经济损失等级。

(4)由于统计口径的差异和部分统计数据的缺失,许多指标是采用估值计算,因此本文计算得到的生态经济损失,也只能是粗略的,趋势性结果,今后,生态系统的恢复和服务功能市场定位是研究的重点方向。

References:

[1] Wen-Tzu Lin, Wen-Chieh Chou, Chao-Yuan Lin, Pi-Hui Huang, Jing-Shyan Tsai. Vegetation recovery monitoring and assessment at landslides caused by earthquake in Central Taiwan. Forest Ecology and Management, 2005, 210 (3): 55 -66.

[2] BoumansR, CostanzaR, FarleyJ, *et al*. Modeling the dynamics of the integrated earth system and the value of global ecosystem service susing the GUMBO mode. Ecological Economics, 2002, 41 (3): 529 -560.

[3] R, d'ArgeR, Groot R, *et al*. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 2002, 387 (15): 253 -260.

[4] Rudolf S. de Groot, Matthew A. Wilson, Roelof M. J. Boumans. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions Goods and ervices. Ecological Economics, 2002, 41 (3): 393 -408.

[5] Eulàlia Gràcia, Raimon Pallàs, Juan Ignacio Soto, Menchu Comas, Ximena Moreno, Eulàlia Masana, Pere Santanach, Susana Diez, Margarita García, Juanjo Dan obeitia. Active faulting offshore SE Spain (Alboran Sea): Implications for earthquake hazard assessment in the Southern Iberian Margin. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 241 (4): 734 -749.

[6] Feyza Cinicioglu S, Ilknur Bozbey, Sadik Oztoprak, Kubilay Kelesoglu M. An integrated earthquake damage assessment methodology and its application for two districts in Istanbul, Turkey. Engineering Geology, 2007, 94 (3-4): 145 -165.

[7] Wen-Tzu Lin Chao-Yuan Lin, Wen-Chieh Chou. Assessment of vegetation recovery and soil erosion at landslides caused by a catastrophic earthquake: A case study in Central Taiwan. Ecological Engineering, 2006, 28 (1):79 -89.

[8] Michael W. Tantala Guy J P. Nordenson George Deodatis, Klaus Jacob. Earthquake loss estimation for the New York City Metropolitan Region. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2008, 28 (11): 812 -835.

[9] Juliet F Bird, Julian J. Bommer. Earthquake losses due to ground failure. Engineering Geology, 2004, 75 (2): 147 -179.

[10] Robert J. Losey. Earthquakes and tsunami as elements of environmental disturbance on the Northwest Coast of North America. Journal of Anthropological Archaeology, 2005, 24 (2): 101 -116.

[11] Ergonul S. A probabilistic approach for earthquake loss estimation. Structural Safety, 2005, 27 (4): 309 -321.

[12] Chen Zhong-Xin, Zhang Xin-Shi. The value of ecosystem effective in china. Chinese Science Bulletin, 2000, 45 (1): 17 -22.

[13] Liu M C, Li D Q, Wen Y M, Luan X F. The spatial analysis of soil retention function in Sanjiangyuan region and its value evaluation. China Environmental Science, 2005, 25 (2): 1280 -1287.

[14] Zhang S F, Yu P, Sun B. Estimating Compensation for Damaged Vegetation Ecosystem in Shaanxi Province based on HEA. Resources Science, 2007, 29 (6): 61 -68.

[15] Anjali Bahuguna, Shailesh Nayak, Dam Roy. Impact of the tsunami and earthquake of 26th December 2004 on the vital coastal ecosystems of the Andaman and Nicobar Islands assessed using RESOURCESAT AWiFS data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10 (2): 229 -237

[16] Juliet F Bird, Julian J. Bommer, Helen Crowley, Rui Pinho. Modellingliquefaction-induced building damage in earthquake loss estimation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26 (1): 15 -30

[17] Bao W K, Wang C M. Degradation mechanism of mountain ecosystem at the dry valley in the upper reaches of the minjiang river. Journal of Mountain Research, 2000, 18(1): 57 -62.

[18] Wolong vegetation and plant resources in the preparation group. Wolong vegetation and plant resources. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1987. 111 -115.

[19] Wu N. Degradation of mountain ecosystems restoration and reconstruction — the upper reaches of the Minjiang theory and practice. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2007. 198 -210.

参考文献:

[12] 陈仲新,张新时. 中国生态系统效益的价值. 科学通报,2000,45(1):17 ~ 22.

[13] 刘敏超,李迪强,温琰茂,栾晓峰. 三江源地区生态系统生态功能分析及其价值评估. 环境科学学报,2005,25(9):1280 ~ 1287.

[14] 张思锋, 余平, 孙博. 基于 HEA 方法的陕西省受损植被生态服务功能补偿评估. 资源科学,2007,29(6):61 ~ 68.

[17] 包维楷,王春明. 岷江上游山地生态系统退化机制. 山地学报,2000,18(1):57 ~ 62.

[18] 卧龙植被及资源植物编写组. 卧龙植被及资源植 物. 成都:四川科学技术出版社,1987. 111 ~ 115.

[19] 吴宁. 山地退化生态系统的恢复重建——理论与岷江上游的实践. 成都:四川科学技术出版社,2007. 198 ~ 210.