

张宝军. 2003 - 2013 年汶川地震极重灾区夜间灯光年际变化分析[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 12 - 18, 22. [ZHANG Baojun. Analysis of the Inter - annual Variation of Nighttime Lights in the Most Affected Area of Wenchuan Earthquake from 2003 to 2013 [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(1): 12 - 18, 22. doi: 10.3969/j.issn.1000 - 811X.2018.01.003.]

2003 - 2013 年汶川地震极重灾区夜间 灯光年际变化分析*

张宝军^{1,2}

(1. 民政部国家减灾中心, 北京 100124; 2. 民政部卫星减灾应用中心, 北京 100124)

摘要: 自然灾害往往造成灾区光源载体的破坏, 同时伴随着恢复重建过程光源载体又得到修复或新建, 因此夜间灯光变化在一定程度上能够反映重大自然灾害对灾区社会经济的影响。基于 DMSP - OLS 夜间灯光遥感数据, 分析汶川地震极重灾区夜间灯光分布范围和强度的年际变化特点, 并与地区生产总值和全社会固定资产投资年际变化进行对比分析, 探索分析夜间灯光变化与灾害损失的相关关系。研究表明, 2003 - 2013 年汶川地震极重灾区的夜间灯光分布强度年际变化与地区生产总值和全社会固定资产投资年际变化存在相关关系, 基本呈现出灾害当年的夜间灯光遥感影像亮值像元个数和亮值像元数值少于前 1 年, 灾后第 1 年继续减少, 灾后第 2 年急剧增加并达到峰值; 同时, 灾后夜间灯光遥感影像亮值像元个数和亮值像元数值的减少与因灾死亡和失踪人口、万人死亡失踪率和万人倒塌房屋率等灾情指标存在较显著的相关关系。

关键词: 汶川地震; 灾害; 夜间灯光; 遥感; DMSP - OLS

中图分类号: X43; F29; P20 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 - 811X(2018)01 - 0012 - 08

doi: 10.3969/j.issn.1000 - 811X.2018.01.003

夜间灯光遥感起源于科学家意外的发现^[1-2]。传统的遥感影像已经在日常的灾害管理和重特大自然灾害应对中得到了广泛地应用并扮演着越来越重要的角色^[3]。相比于传统的遥感卫星影像, 夜间灯光遥感影像可以更多地反映人类活动, 因此它被广泛应用于社会经济领域的空间数据挖掘^[2], 同时也被应用于自然灾害影响评估研究^[4-5]。重大自然灾害或灾难事件发生后, 往往会对承载光源的基础设施、公共服务设施、居民住房等造成严重破坏, 导致灾害影响区域灯光分布范围和强度的变化; 同时, 由于恢复重建工作的开展, 基础设施、公共服务设施、居民住房等光源载体会得到恢复重建, 这也伴随着灯光分布范围和强度的变化。LI 等学者利用 2008 年 1 月至 2014 年 2 月期间的 38 幅月度合成 DMSP - OLS 夜间灯光遥感影像数据监测了战争造成叙利亚夜间灯光损失情况^[6], 成功展现了夜间灯光遥感应用于突发事件影响分析的独特魅力。本文基于 DMSP - OLS 夜间灯光遥感数据, 分别使用夜间灯光遥感

影像亮值像元个数和亮值像元数值表征研究区域夜间灯光分布范围和强度, 分析汶川地震极重灾区 2003 - 2013 年夜间灯光分布范围和强度的年际变化特点, 并与地区生产总值和全社会固定资产投资年际变化进行对比, 探索研究灾区夜间灯光变化与灾害损失之间的相关关系。

1 研究区域与数据准备

1.1 研究区域

研究区域为 2008 年 7 月 22 日《汶川地震灾害范围评估结果》确定的汶川地震极重灾区, 共 10 个县(市、区), 分别是四川省汶川县、北川县、绵竹市、什邡市、青川县、茂县、安县、都江堰市、平武县、彭州市^[7]。极重灾区县(市、区)均位于汶川地震 X、XI 度烈度区, 因灾死亡与失踪人数都大于 1 000 人, 排名前三位的汶川、北川和绵竹因灾死亡和失踪人数都超过 10 000 人^[8]。极重灾区因灾死亡和失踪人数

* 收稿日期: 2017 - 05 - 11 修回日期: 2017 - 06 - 30

基金项目: 国家质检公益性行业科研专项项目(201510211); 国家自然科学基金项目(913241027)

作者简介: 张宝军(1981 -), 男, 甘肃靖远人, 博士, 副研究员, 主要从事自然灾害管理和减灾救灾标准化研究。

E-mail: baojunz@126.com

占汶川地震死亡和失踪总人数的 97.2%，因灾倒塌房屋间数占汶川地震因灾倒塌房屋总间数的 42.9%，因灾直接经济损失占汶川地震直接经济损失总量的 39.5%^[8]。

根据 2014 年四川统计年鉴^[9]，研究区域 10 个县(市、区)2013 年的常住人口总数为 348.3 万人，其中城镇人口 146 万人，城镇化率为 41.93%；研究区域 10 个县(市、区)2013 年的地区生产总值为 3 134.8 亿元，占 2013 年四川全省地区生产总值的 11.94%；研究区域 10 个县(市、区)2013 年全社会固定资产投资总额为 891.6 亿元，占 2013 年四川全省全社会固定资产投资总额的 4.24%。

1.2 数据来源

研究数据包括四种：夜间灯光遥感数据、社会经济统计数据、灾害损失数据和行政边界数据。

(1)夜间灯光遥感数据：美国国家地球物理数据中心(National Geophysical Data Center)发布的第四版 DMSP - OLS (Defense Meteorological Satellite Program - Operational Linescan System)夜间灯光遥感影像数据集，使用 2003 - 2013 年的 11 幅夜间稳定灯光遥感影像数据，其中 2003 年的数据由 F15 卫星数据合成，2004 - 2009 年的数据由 F16 卫星数据合成，2010 - 2013 年的数据由 F18 卫星数据合成。

(2)社会经济统计数据：2004 - 2014 年《四川统计年鉴》^[9]，主要使用汶川地震极重灾区 10 个县(市、区)的 2003 - 2013 年的行政区域人口、地区生产总值和全社会固定资产投资三类数据。

(3)灾害损失数据：《汶川地震灾害综合分析与评估》^[8]，主要使用汶川地震极重灾区 10 个县(市、区)的因灾死亡和失踪人数、万人死亡失踪率和万人倒塌房屋率。

(4)行政边界数据：国家基础地理信息中心公开发布的中国 1:400 万基础地理信息数据集，主要使用研究区域 10 个县(市、区)2008 年的县级行政边界数据。2009 年 2 月 6 日，民政部以民函[2009]41 号文批复同意将安县的安昌镇、永安镇、黄土镇的常乐、红岩、顺义、红旗、温泉、东鱼 6 个村划归北川县管辖，北川县政府驻地由曲山镇迁至安昌镇^[10]。2016 年 3 月 20 日，国务院以国函[2016]57 号，同意撤销安县，设立绵阳市安州区，以原安县的行政区域为安州区的行政区域^[11]。为了便于进行 2003 - 2013 年间相同区域夜间灯光变化的对比，本文研究区域及子研究区域的划分依然采用 2008 年的县级行政边界数据。

1.3 数据处理

1.3.1 夜间灯光遥感数据预处理

数据预处理主要包括影像投影转换、影像重采样和影像裁剪。

(1)影像投影转换：将选用的 2003 - 2013 年 11 幅 DMSP - OLS 夜间稳定灯光遥感影像空间投影都转换为阿尔伯斯等面积投影。

(2)影像重采样：将投影转换后的影像像元大小重采样为 1km。

(3)影像裁剪：使用研究区域边界数据对重采样后的影像数据进行裁剪，得到 2003 - 2013 年 11 幅空间分辨率为 1km 的研究区域 DMSP - OLS 夜间稳定灯光遥感影像数据。

1.3.2 夜间灯光遥感数据相互校正

为了消除 DMSP - OLS 夜间灯光遥感影像不同年份间相同位置像元 DN 值的异常波动，增强长时间序列数据的可比性，需要对预处理后的夜间灯光遥感影像数据进行相互校正。针对 DMSP - OLS 夜间灯光遥感影像的相互校正，很多学者都运用了基于不变目标区域的回归分析法并证明了其有效性^[12-14]。

本文使用不变目标区域法对研究区域 2003 - 2013 年的 11 副 DMSP - OLS 夜间稳定灯光遥感影像数据进行相互校正，具体包括确定参考区域、确定参考影像、建立影像校正回归分析模型和校正影像数据集四个步骤。

(1)确定参考区域：在对研究区域 10 个县(市、区)2003 - 2013 年地区生产总值、全社会固定资产投资数据分析的基础上，选择地区生产总值和全社会固定资产投资两项指标的二次多项式回归相关系数(R2)都最高的彭州市作为参考区域。

(2)确定参考影像：选取研究区域累积 DN 值最高的 F18 传感器获取的 2010 年夜间灯光遥感数据(F182010)作为参考影像。

(3)建立影像校正回归分析模型：在确定了参考区域、参考影像和待校正影像后，分别使用待校正影像与参考影像进行指数、线性、对数、幂数和一元二次多项式 5 种形式的回归分析(图 1)。

经对比分析，一元二次多项式回归的相关系数总体上高于其他回归方式的相关系数，因此选用一元二次多项式回归方程建立影像校正模型，具体公式如下：

$$DN_{\text{regress}} = a \times DN^2 + b \times DN + c. \quad (1)$$

式中： DN_{regress} 表示使用一元二次回归模型校正后影像的像元值； DN 表示待校正影像的像元值； a 、 b 和 c 是一元二次回归模型的参数。

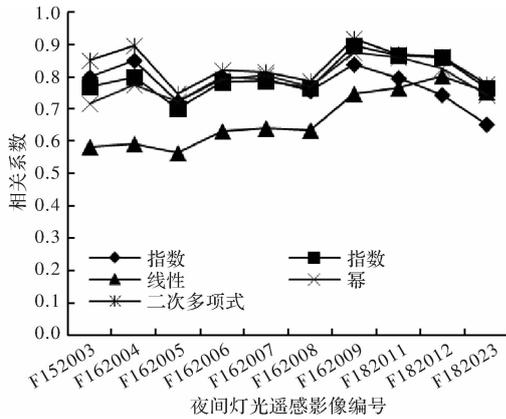


图1 5种回归模型的相关系数

(4) 校正影像数据集

建立影像校正回归分析模型后, 计算出每个年份待校正影像与参考影像的一元二次回归模型的参数(表1)。利用对应的一元二次回归方程对研究区域的2003-2013年的待校正夜间灯光遥感影像进行校正。

表1 2003-2013年DMSP-OLS夜间灯光遥感数据一元二次回归模型参数

卫星编号	年份	a	b	c	R ²	
F15	2003	0.0101	-0.1195	3.6857	0.8496	
	2004	0.0154	-0.1800	4.8808	0.8960	
	2005	0.0097	-0.0057	3.4849	0.7467	
	F16	2006	0.0094	0.1035	3.1687	0.8194
		2007	0.0075	0.1834	2.8975	0.8125
		2008	0.0059	0.1814	3.1177	0.7866
	2009	0.0079	0.3000	3.2096	0.9171	
F18	2010	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	
	2011	0.0016	0.7538	-1.0014	0.8691	
	2012	-0.0040	1.0110	-2.3350	0.8627	
	2013	-0.0147	2.0307	-9.7538	0.7781	

2 夜间灯光数量年际变化分析

使用汶川地震极重灾区各县(市、区)夜间灯光遥感影像亮值像元的总个数(*Sum of Nighttime Lights*, SNL)表征不同区域夜间灯光分布范围变化情况。通过计算基于DMSP-OLP夜间灯光遥感影像数据的10个县(市、区)2003-2013年期间的SNL, 并与地区生产总值、全社会固定资产投资和灾害损失进行对比分析, 研究SNL年际变化特点及其与因灾死亡和失踪人口、倒塌房屋数量等方面灾害损失的相关关系。

2.1 夜间灯光分布年际变化趋势分析

利用校正后的夜间灯光遥感影像数据, 提取并计算2003-2013年10个县(市、区)的SNL(图

2), 其呈现出以下特点。

(1) 10个县(市、区)总体的SNL在2003-2007年为波动变化, 2008年开始下降, 70%的县(市)在2008或2009年出现自2004年以来的最低点(除青川、安州、彭州), 2010年快速增加达到峰值后呈现逐年递减趋势。

(2) 汶川、北川、茂县和平武的SNL在2003-2007年波动最为剧烈, 2008-2009年减少趋势明显(除北川外), 2010年急剧增加达到峰值后又急剧递减。

(3) 绵竹、什邡、安州、都江堰和彭州的SNL在2003-2009年呈现小幅波动, 2010年后开始缓慢递减, 整体上变化波动性不大。

(4) 青川的SNL在2003-2009年呈现出平稳增加趋势, 2010年急剧增加达到峰值后又急剧减少, 2013年开始又缓慢增加。

2.2 典型年份SNL变化对比分析

分别选取10个县(市、区)2007年(汶川地震前一年)、2008年(汶川地震当年)、2010年(恢复重建基本完成)的SNL进行对比分析。2007年与2008年SNL变化比例、2008年与2010年的SNL变化比例(图3), 呈现出以下特点。

(1) 与2007年相比, 10个县(市、区)2008年总体的SNL减少了10.5%, 7个县(市、区)出现了不同程度的减少, 汶川、什邡、茂县和平武4个县(市)的SNL减少比例均超过了10%, 其中汶川减少了50.8%, 茂县减少了42.5%; 北川、青川和安州3个县(区)出现了小幅的增加, 分别增加了2.5%、8.5%和1.8%。从以上数据可以看出, 受强烈地震影响, 汶川地震极重灾区当年的SNL总体上减少了, 7个县(区)SNL不同程度减少, 部分县(区)减少程度明显, 也从侧面反映出灾区光源受损严重。

(2) 与2008年相比, 10个县(市、区)2010年总体的SNL增加了21.8%, 6个县(市、区)出现了不同程度的增加, 汶川、北川、青川、茂县和平武5个县的SNL增加比例超过了20%, 其中汶川增加144.9%, 青川增加346.8%, 茂县增加100.8%。同期, 汶川地区生产总值增加了146.7%, 全社会固定资产投资增加了908.5%; 青川地区生产总值增加了38.3%, 全社会固定资产投资增加了501.9%; 茂县地区生产总值增加了118.2%, 全社会固定资产投资增加了367.3%。从以上数据可以看出, 随着汶川地震恢复重建总体规划及各专项规划的制定与实施, 地震后汶川、青川、茂县的地区生产总值和全社会固定资产投资比例都成倍增长, 城乡住房、公共服务设施等得到恢复或重建, 新的光源载体大量涌现, 导致灾区大部分县(市、区)SNL大幅增加, 也从侧面反映出灾区光源得到了大力恢复和增强。

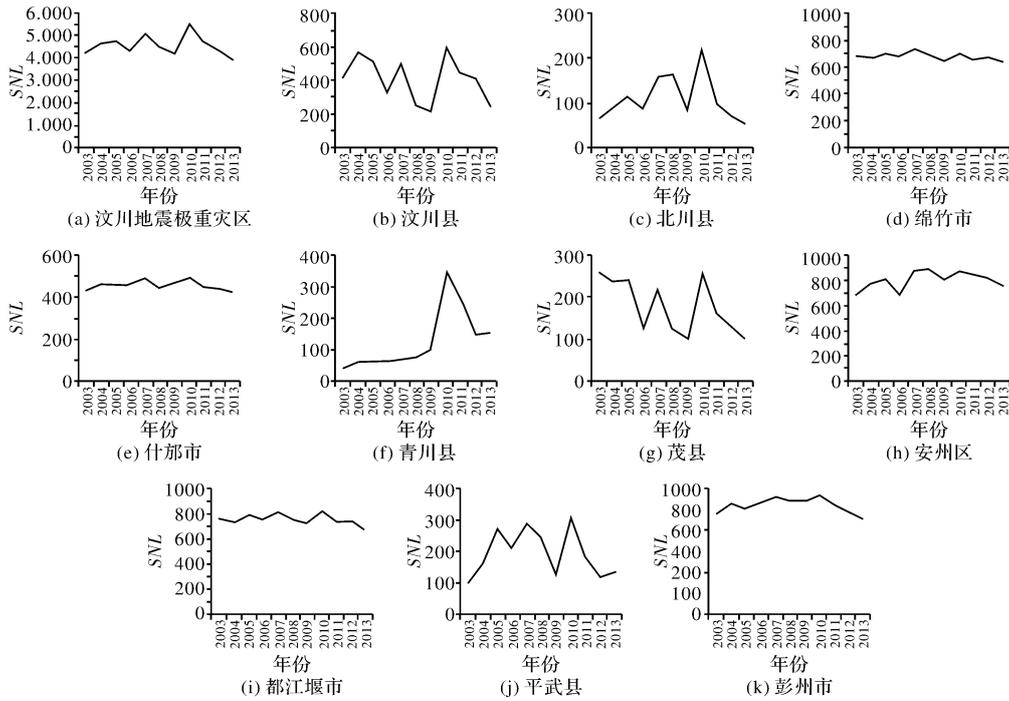


图 2 2003 - 2013 年汶川地震极重灾区 SNL 年际变化

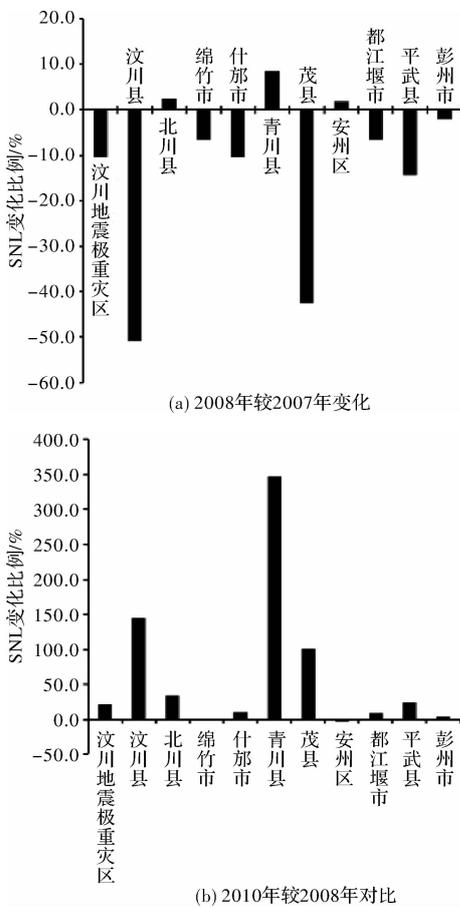


图 3 汶川地震极重灾区及分行政区 SNL 变化比例

2.3 SNL 损失与灾害损失相关性分析

选用中国《自然灾害情况统计制度》、《特别重大自然灾害损失统计制度》以及相关国家标准确定

的自然灾害灾情统计基本指标中的因灾死亡和失踪人口、倒塌房屋数量两项灾害损失情况统计核心指标^[15]，与 SNL 进行相关分析。通过计算 10 个县(市、区)2007 年与 2009 年之间 SNL 的减少值，选取 SNL 出现减少的汶川、北川、绵竹、什邡、茂县、安州、都江堰、平武和彭州 9 个县(市、区)的因灾死亡和失踪人数、万人死亡失踪率、万人倒塌房屋率分别与 SNL 减少数和 SNL 减少比例进行线性回归分析(图 4)。计算得到 SNL 减少数与因灾死亡和失踪人数、万人死亡失踪率、万人倒塌房屋率存在的相关系数 R^2 分别是 0.42、0.615 和 0.6622，得到 SNL 减少比例与因灾死亡和失踪人数、万人死亡失踪率、万人倒塌房屋率存在的相关系数 R^2 分别是 0.3192、0.4625 和 0.3154。说明 SNL 损失与因灾死亡和失踪人数、倒塌房屋存在相关关系，这也说明灾害前后的夜间灯光分布范围变化可以在一定程度上反映灾害的影响。

3 夜间灯光强度年际变化分析

使用汶川地震极重灾区各县(市、区)夜间灯光遥感影像亮值像元的总数值 (*Sum of Nighttime Lights Value*, SNLV) 表征不同区域夜间灯光分布强度变化情况。通过计算基于 DMSP - OLP 夜间灯光遥感影像数据的 10 个县(市、区)2003 - 2013 年期间的 SNLV，并与地区生产总值、全社会固定资产

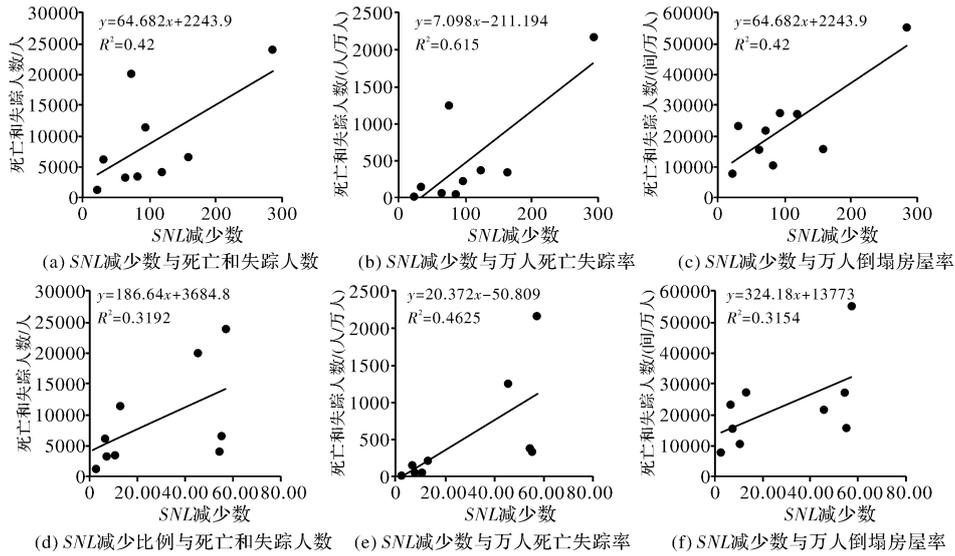


图4 SNLV损失与灾害损失相关关系散点图

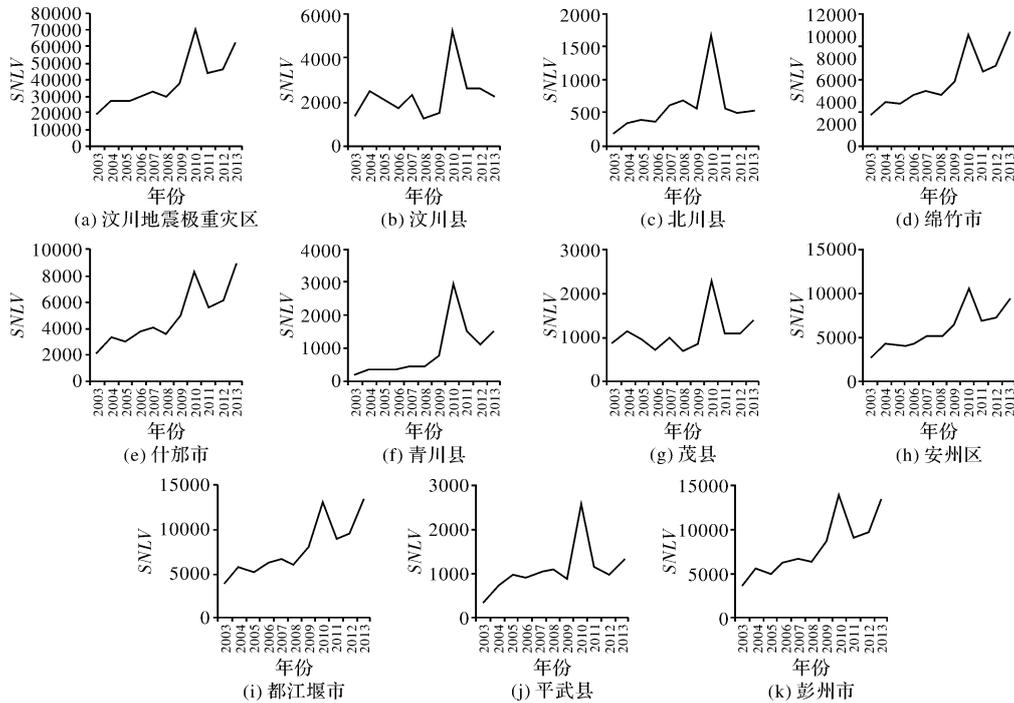


图5 2003-2013年汶川地震极重灾区SNLV年际变化

投资和灾害损失进行对比分析, 研究 SNLV 年际变化特点及其与灾害损失的关系。

3.1 夜间灯光强度年际变化趋势分析

利用校正后的夜间灯光遥感影像数据, 提取并计算 2003-2013 年 10 个县(市、区)的 SNLV(图 5), 其呈现出以下特点。

(1) 10 个县(市、区)总体的 SNLV 在 2003-2010 年呈现出平稳增加趋势, 2008 年有所减少, 2010 年急剧增加后达到峰值, 2011 年又急剧减少, 2012-2013 年呈现逐年递增趋势。

(2) 汶川的 SNLV 在 2003-2007 年呈现波动变

化, 70% 的县(市、区)在 2008 快速减少后出现 2007 年以来的最低点, 2010 年急剧增加达到峰值, 2011 年又急剧减少并呈现出逐年递减趋势。

(3) 北川、绵竹、什邡、青川、茂县、安州、都江堰、平武和彭州的 SNLV 在 2003-2009 年呈现小幅波动或缓慢增加趋势, 2008 年有所减少(除北川和平武外), 2010 年开始急剧增加并达到峰值, 2011 年急剧减少, 2012-2013 年呈现逐年递增趋势。

3.2 典型年份 SNLV 变化对比分析

分别选取 10 个县(市、区)2007 年、2008 年、

2010 年的 *SNLV*、地区生产总值、全社会固定资产投资进行对比分析。2007 年与 2008 年 *SNLV* 变化比例、2008 年与 2010 年的 *SNLV* 变化比例(图 6), 呈现以下特点。

(1) 与 2007 年相比, 10 个县(市、区)2008 年总体的 *SNLV* 减少了 8.3%, 地区生产总值减少了 23.7%, 全社会固定资产投资减少了 2.8%。8 个县(市、区)出现了不同程度的减少, 汶川、什邡和茂县 3 个县的 *SNLV* 减少比例均超过了 10%, 其中汶川的 *SNLV* 减少了 44.1%, 地区生产总值减少了 52.4%, 全社会固定资产投资减少了 40.3%。2 个县出现了增加, 其中北川的 *SNLV* 增加 13.5%, 全社会固定资产投资增加了 131.1%。

(2) 与 2008 年相比, 10 个县(市、区)2010 年总体的 *SNLV* 增加了 132.4%, 地区生产总值增加了 23.7%, 全社会固定资产投资增加了 285.2%; 10 个县(市、区) *SNLV* 增加比例均超过了 100%, 其中汶川 *SNLV* 增加 298.2%, 地区生产总值增加了 146.7%, 全社会固定资产投资增加了 908.5%; 青川 *SNLV* 增加 530.3%, 地区生产总值增加了 38.3%, 全社会固定资产投资增加了 501.9%; 茂县 *SNLV* 增加 218.3%, 地区生产总值增加了 118.2%, 全社会固定资产投资增加了 367.3%。

3.3 *SNLV* 损失与灾害损失对比分析

通过计算 10 个县(市、区)2007 年与 2008 年之间 *SNLV* 的减少值, 选取 *SNLV* 出现减少的汶川、绵竹、什邡、茂县、安州、都江堰和彭州 7 个县(市、区)的因灾死亡和失踪人数、万人死亡失踪率、万人倒塌房屋率分别与 *SNLV* 减少数和 *SNLV* 减少比例进行线性回归分析(图 7)。

计算得到 *SNLV* 减少数与因灾死亡和失踪人数、万人死亡失踪率、万人倒塌房屋率存在的相关系数 R^2 分别是 0.6434、0.7265 和 0.5205, 得到 *SNLV* 减少比例与因灾死亡和失踪人数、万人死亡失踪率、万人倒塌房屋率存在的相关系数 R^2 分别是 0.5885、0.8246 和 0.7656。说明 *SNLV* 的减少与因灾死亡和失踪人数、倒塌房屋存在相关关系, 这也说明灾害前后的夜间灯光强度变化可以在一定程度上反映灾害的影响。

4 结论与讨论

由于夜间灯光遥感影像能够直接反映出重大自然灾害灾前、灾中和灾后的基础设施、公共服务设施、居民住房等的光源载体的分布和集中程

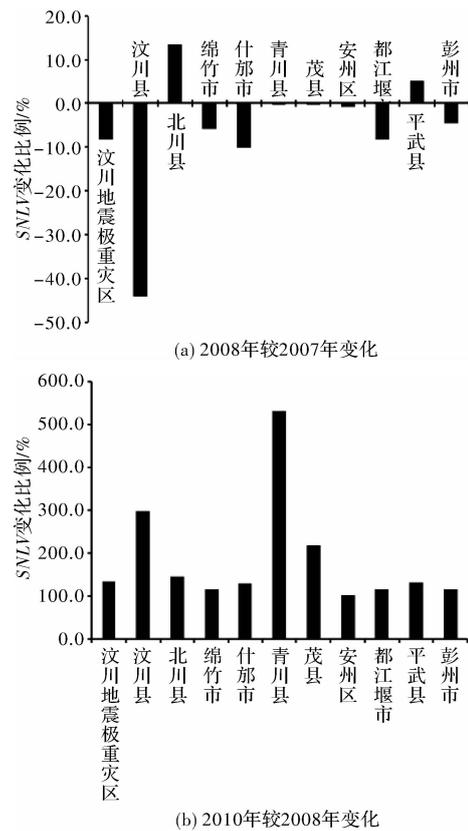


图 6 汶川地震极重灾区及分行政区 *SNLV* 变化比例

度, 将其应用于重大自然灾害影响分析具有独特的优势。但是, DMSP - OLS 夜间灯光遥感影像仍然存在辐射质量不高、空间分辨率较低等缺陷, 在应用研究时往往存在定量化程度不高、变化检测误差较大的问题^[2], 在一定程度上影响了其在重大自然灾害影响分析中的应用。

(1) 夜间灯光与人类活动息息相关, 可以表征基础设施、公共服务设施、居民住房的分布及规模, 重大自然灾害发生后, 往往造成灾区电力中断或大面积停电, 通过重大自然灾害前后灾区夜间灯光分布和强度的变化对比, 可以分析重大自然灾害对灾区光源载体的破坏情况。夜间灯光遥感影像对于开展重大自然灾害影响和损失评估具有重要的参考价值。

(2) *SNLV* 与地区生产总值和全社会固定资产投资有明显的相关关系, 基本呈现出灾害当年(2008 年)的 *SNLV* 均少于前一年(2007 年)的趋势, 并在灾后第一年(2009 年)继续减少; 同时, 由于恢复重建工作的开展, 灾后第二年(2010 年)的 *SNL* 和 *SNLV* 急剧增加并明显高于灾害当年。

(3) 夜间灯光分布数量和强度的减少, 可以在一定程度上反映重大自然灾害的损失情况。分析灾害发生前后两年的 *SNL*、*SNLV* 减少量, 并与因

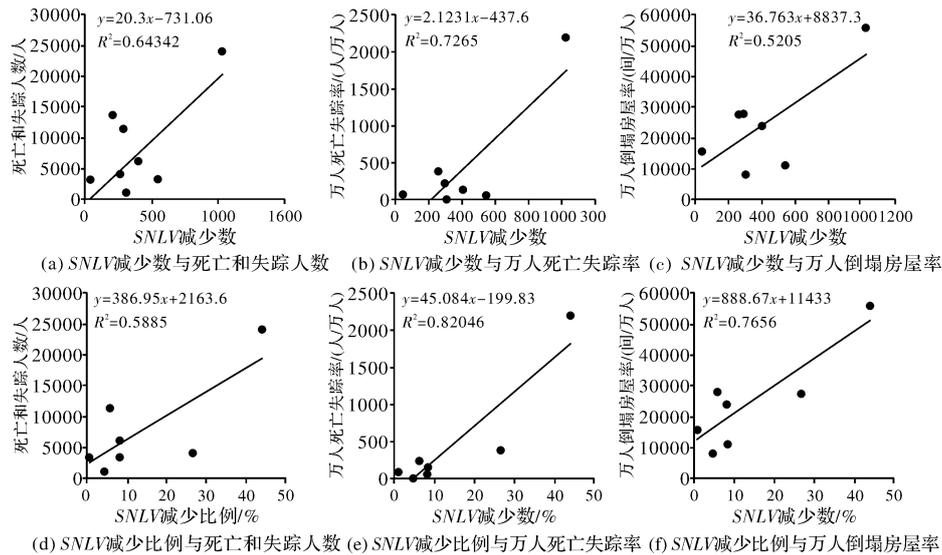


图7 SNLV损失与灾害损失相关关系散点图

灾死亡和失踪人数、万人死亡失踪率、万人倒塌房屋率等灾情核心指标进行相关分析,发现灾区夜间灯光分布数量和强度的减少与上述灾情核心指标存在显著的线性相关关系,表明夜间灯光分布范围与强度变化可以在一定程度上反映灾害的影响。同时,由于本文选取汶川地震灾区10个极重灾县作为研究区,在线性关系分析上存在样本数据较少的缺陷,下一步计划对汶川地震极重灾区和重灾区的51个县(市、区)的夜间灯光变化进行分析研究。

(4) DMSPP-OLS 夜间稳定灯光数据集(1992-2013年)适合大尺度的研究和时间序列分析,对于分析重大自然灾害对灾区较长时期社会经济发展的影响具有重要的作用。如果想要使用夜间灯光遥感影像数据进行重大自然灾害损失的快速评估,最好使用更高时间分辨率的数据进行分析;如果想使用夜间灯光遥感影像数据进行重大自然灾害损失综合评估或详细评估,则需要使用更高时空分辨率的数据,同时需要配合使用高时空分辨率的传统遥感影像数据。

(5) 鉴于夜间灯光遥感数据其应用领域的广泛性、应用成本的低廉性、应用价值的独特性等特点,我国也正在研制专业夜光遥感卫星,这将极大地推动我国夜光遥感技术的发展和应

参考文献:

[1] CROFT T A. Nighttime images of the earth from space [J]. Scientific American, 1978, 239(1): 86-98.

[2] 李德仁, 李熙. 论夜光遥感数据挖掘[J]. 测绘学报, 2015, 44(6): 591-601.

[3] 张宝军, 陈厦, 李仪. 自然灾害遥感应用标准体系构建方法研究[J]. 防灾科技学院学报, 2016, 18(3): 1-10.

[4] Takashima M, Hayashi H, Kimura H, et al. Earthquake Damaged Area Estimation Using DMSPP/OLS Night-time Imagery - Application for Hanshin-Awaji Earthquake. IEEE, 2000, 1(6): 336-338.

[5] 刘双庆. 引入一种新型震害快速评估基础数据的尝试——DMSPP/OLS 卫星夜光数据的使用[J]. 防灾科技学院学报, 2012, 14(3): 70-75.

[6] LI Xi, LI Deren. Can night-time light images play a role in evaluating the Syrian Crisis? [J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(18): 6648-6661.

[7] 民政部, 发展改革委, 财政部, 等. 汶川地震灾害范围评估结果[EB/OL]. (2008-07-22) [2008-07-22]. http://www.gov.cn/zw/gk/2008-07/22/content_1052835.htm.

[8] 国家减灾委委员会、科学技术部抗震救灾专家组. 汶川地震灾害综合损失分析与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[9] 四川省统计局. 四川统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004-2014.

[10] 民政部. 关于四川省调整北川羌族自治县行政区划的批复[EB/OL]. (2009-02-01) [2009-02-01]. <http://www.mca.gov.cn/article/zw/gk/fvfg/qhdm/200902/20090210026481.shtml>.

[11] 民政部. 中华人民共和国2016年县级以上行政区划变更情况[EB/OL]. (2016-09-16) [2016-09-16]. <http://xzqh.mca.gov.cn/description?depid=2016>.

[12] ELVIDGE C. D, ZISKIN D, BAUGH K. E, et al. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data [J]. Energies, 2009, 2(3): 595-622.

[13] FC Hsu, K Baugh, T Ghosh, et al. DMSPP-OLS radiance calibrated nighttime lights time series with intercalibration [J]. Remote Sensing, 2015, 7(2): 1855-1876.

[14] 曹子阳, 吴志峰, 匡耀求, 等. DMSPP/OLS 夜间灯光影像中国区域的校正及应用[J]. 地球信息科学, 2015, 17(9): 1092-1101.

[15] 张宝军. 我国自然灾害情况统计制度与标准化进展[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 150-155.

(下转第22页)