科学通报 2011 年 第 56 卷 第 12 期：895 ~ 901
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

2011 年日本东北 9.0 级大地震灾区建筑物与农田灾情遥感评估

郭华东*, 陈玉*, 冯强, 蔺启忠, 王菲

中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094
* 联系人, E-mail: hdguo@ceode.ac.cn; yuchen@ceode.ac.cn

2011-03-21 收稿, 2011-04-11 接受
国家高技术研究发展计划(2009AA12Z102, 2009AA12Z147)和国家重点基础研究发展计划(2009CB723906)资助项目

摘要 北京时间 2011 年 3 月 11 日 13 时 46 分, 在日本本州东海岸附近海域发生 9.0 级地震, 地震发生后中国科学院对地观测中心迅速启动重大灾害应急响应及时对灾情进行评估. 本文首先基于灾前多光谱遥感影像提取了地震重灾区岩手、宫城、福岛三县的建筑物与农田信息, 然后通过与地震烈度分区的叠置分析, 评估了建筑物的受损情况. 同时, 通过建立基于地形与距离海岸线距离的海啸影响程度评估模型, 分析了重灾区沿海岸线建筑物与农田受海啸影响的损失结果. 评估结果部分采用灾后高分辨率影像进行了验证. 结果表明, 宫城县由地震及其诱发海啸造成的损失最大, 全县 76%左右的建筑遭受的地震烈度达 6 度以上(日本烈度表示法), 24%左右的建筑与 12%左右的农田遭受海啸入侵, 其次损失为福岛、岩手两县. 该结果为进一步开展经济、社会等灾情分析与评估提供了科学数据.

关键词
日本
地震
海啸
灾情评估
灾害应急响应

北京时间 2011 年 3 月 11 日 13 时 46 分, 日本本州岛仙台港以东 130 km 处发生 9.0 级地震. 此次地震及其诱发的海啸给人民带来巨大的生命财产损失. 据日本警察厅 3 月 31 日宣布, 截至当天 18 时, 日本强震及其引发的海啸已确认造成 11438 人死亡, 16541 人失踪(http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo_e.pdf). 地震及其诱发的海啸对建筑、农田的损毁情况, 由于关系到灾后重建与粮食安全, 是灾情评估的重点之一. 遥感卫星 TM/ETM 影像由于空间分辨率适中, 在地物分类、特别是县市一级区域农田、建筑物提取中已被广泛的应用[1,2]. 基于灾前 ETM 影像数据, 笔者提取了地震重灾区岩手、宫城、福岛三县的建筑物、农田分布情况, 结合地震烈度的空间分布 (http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/suikei/201103111446_288/201103111446_288_1.html), 评估了地震导致的建筑整体受损情况. 利用地形与距离海岸线距离数据, 建立了本次地震诱发的海啸对沿岸建筑物、农田的影响程度模型. 最后, 采用灾后高分辨率光学影像对其进行了局部验证.

1 建筑与农田信息提取

图 1 为日本地震重灾区宫城、岩手、福岛三县的灾前 ETM743 波段合成影像. 影像由 3 景拼接剪裁完成, 3 景影像轨道号分别为 107/32, 107/33 和 107/34. 前两景时相为 2000 年 9 月 21 号, 后一景时相为 2000 年 9 月 24 号. 由于日本城市化在 20 世纪 70 年代已经完成, 其城市扩张与土地利用从 2000 年以来并不明显, 在 Google Earth 上对仙台、大崎、南相马市等地区从 2000 年以来多期高分辨率遥感影像的变化对比中可以证实这一点. 如图 2(a)~(c)所示为仙台市城乡结合部(中心经纬度: 140°56′42″E, 38°13′27″N)自 2000 年以来土地利用变化对比图, 可以看出其建筑与农田用地基本无变化. 另外, 9 月下旬农田光谱特征与山区植被区别明显, 选用该时相的数据可以一

英文版见: Guo H D, Chen Y, Feng Q, et al. Assessment of damage to buildings and farms during the 2011 *M*9.0 earthquake and tsunami in Japan from remote sensing data. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-011-4520-1

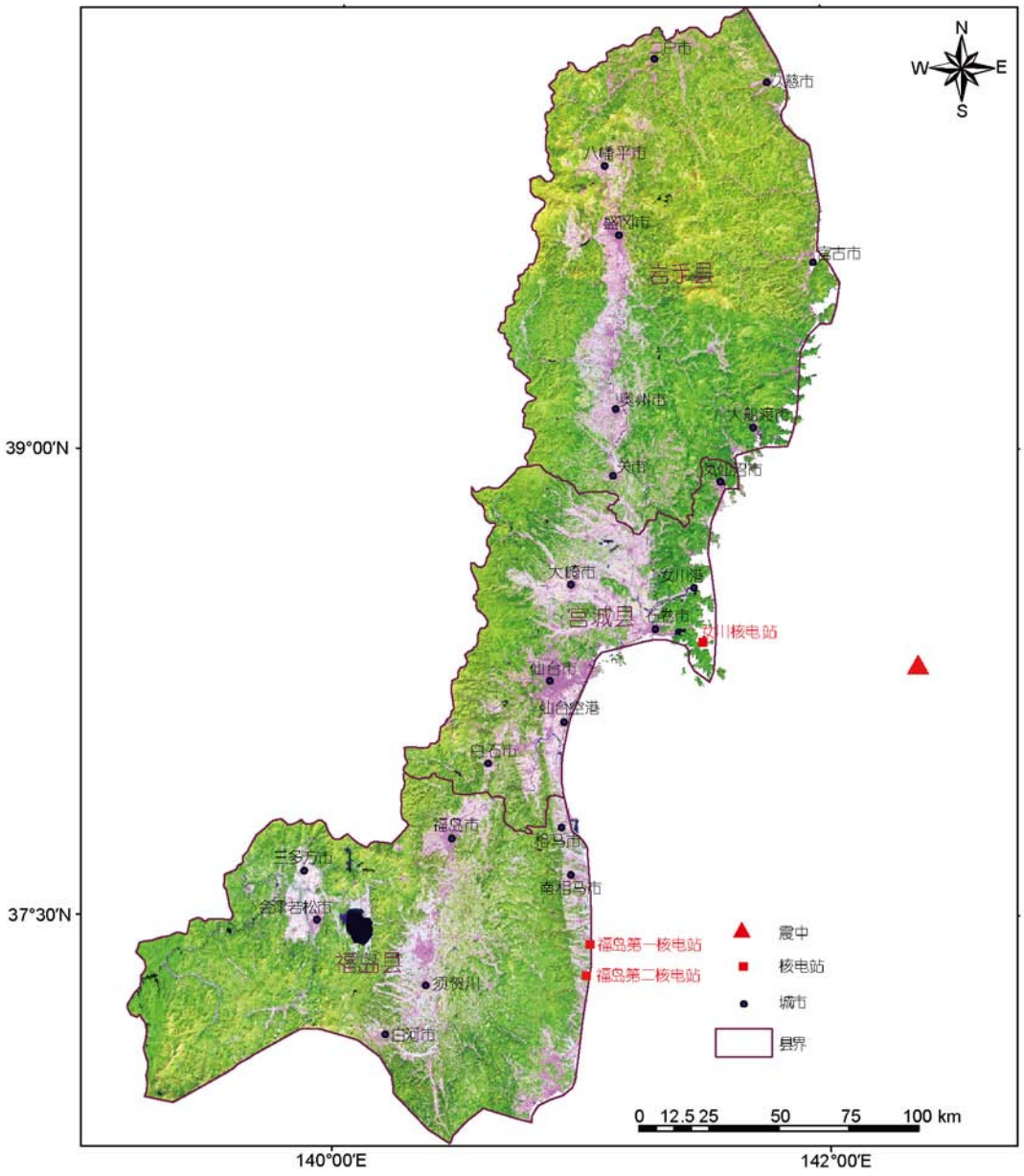

图 1　重灾区 ETM 7, 4, 3 波段合成影像

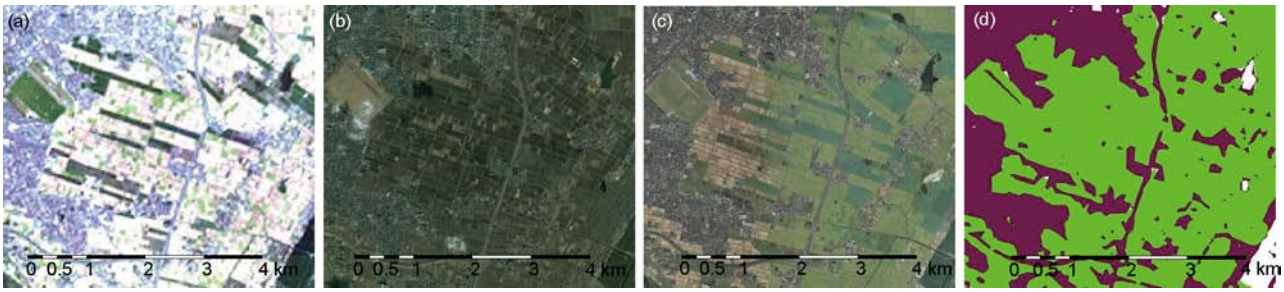

图 2　仙台市城郊土地利用变化与信息提取结果

(a) 2000 年 9 月 21 日 ETM 影像; (b) 2001 年 12 月 26 日高分辨率影像; (c) 2008 年 8 月 31 日高分辨率影像; (d) 基于 ETM 的建筑(紫色)与农田(绿色)信息提取结果

定程度上保证信息提取结果的准确性.

建筑与农田信息的提取基于平行六面体法, 提取结果如图 3 所示. 其中建筑包括房屋、道路、工程设施. 农田为在相对平坦土地上季节性的农作物, 不包括山丘地带的果树与林木. 信息提取结果采用高分辨遥感影像进行了部分验证, 如图 2(d)所示. 重灾区各县建筑与农田的面积统计见表 1.

表 1　重灾区各县建筑与农田面积统计

	建筑(km^2)	农田(km^2)
岩手县	590.771	1818.357
宫城县	713.611	1873.449
福岛县	354.006	2248.504
合计	1658.388	5940.31

2　地震导致建筑受损分析

图 3 小图为日本气象厅震后发布的地震烈度空间分布图. 烈度级别采用日本烈度表示法[3], 7 度烈度为最高级别烈度, 相对应于中国使用的 12 级别烈度的 11 度以上(http://www.csi.ac.cn/ymd/flfg/fd007.htm). 从中可以看出, 本次地震虽然释放能量巨大,

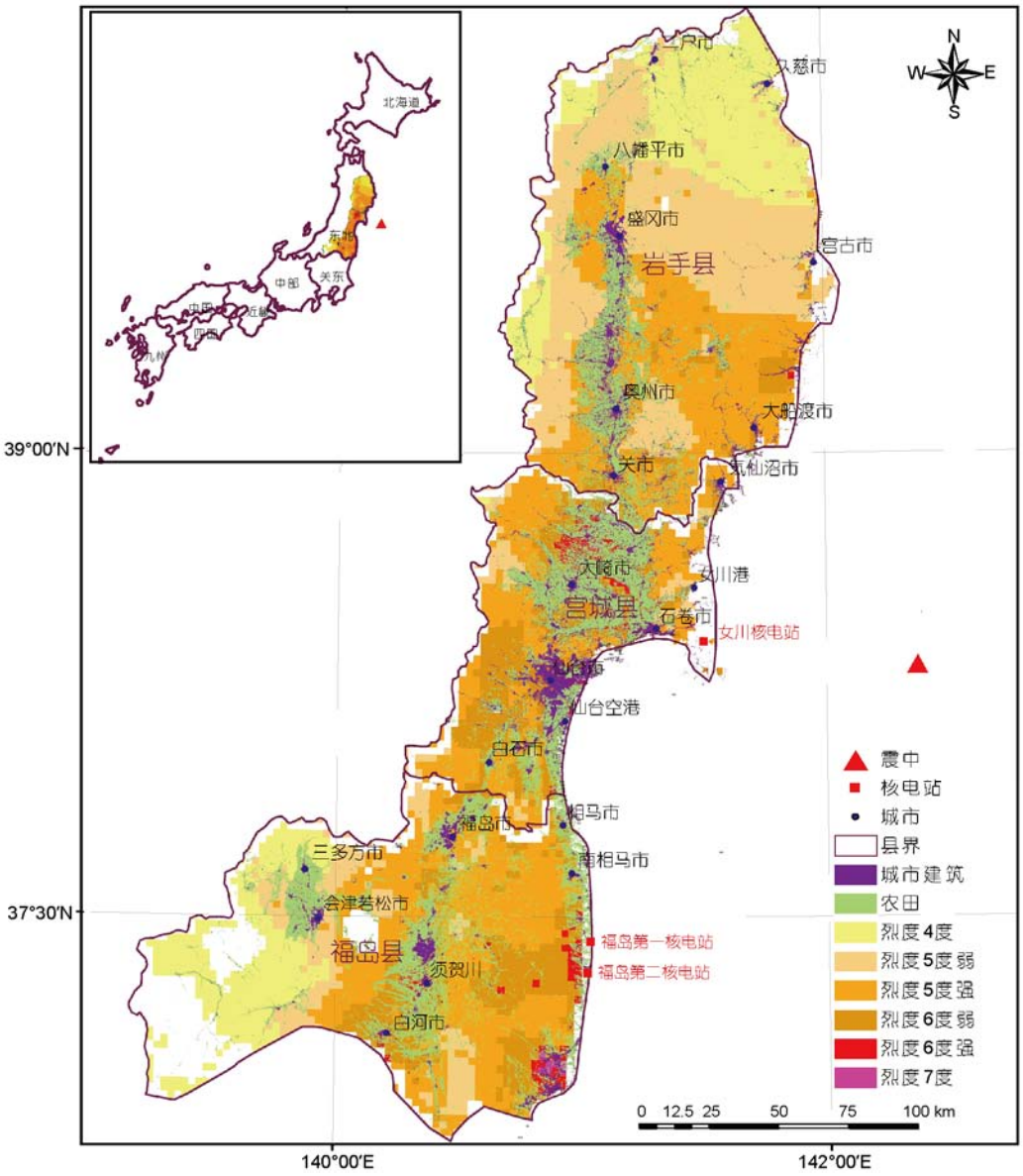

图 3　重灾区建筑与农田提取与地震烈度叠置分析

但由于震源在海里, 距离日本本土约 130 km, 其烈度除福岛县东南及宫城县北部部分地区处于最高级别外, 其余地区多处在 6 度及 5 度烈度区. 福岛县西部及岩手县北部部分地区处于4度烈度区. 通过烈度与建筑物分布的叠置分析, 统计各县建筑所处的地震烈度信息见表 2. 按照日本烈度级别划分对各级别的描述[3], 7 度为激震, 房屋倒塌 30%以上(日本房屋建筑防震能力普遍较高), 山崩、地裂、有断层发生. 6 度为烈震, 房屋倒塌 30%以下, 山崩、地裂、多数人无法站立. 5 度为强震, 墙壁裂缝, 墓碑、石灯笼倒塌, 烟囱毁坏. 从统计结果可以看出, 宫城县遭受 6 度以上烈度的建筑无论从面积绝对值还是所占比例上都是最大的, 为此次地震受损最严重地区, 其次为福岛县.

3 海啸入侵受损模拟分析

此次地震的另外一个显著特征是其诱发的海啸造成的伤亡损失惨重. 英国研究人员认为, 本次日本强震所触发海啸浪高至 10 m、侵入内陆数千米, 就规模而言可能是“千年一遇”, 也有部分媒体报道称侵入境内达 10 km. 一定浪高的海啸对沿岸建筑、农田的影响受地形、距离海岸线距离、地表粗糙度等因素影响. 笔者尝试采用地面高程(DEM)与距离海岸线距离数据, 建立如下的海啸影响程度模型公式:

$$F=f\,(H+k\cdot D)$$

式中 H 表示评估点与海面高差, 研究采用基于日本经济产业省(METI)和美国宇航局(NASA)提供的全球数字高程模型 Global Digital Elevation Model (GDEM)数据, 其相对高程精度可达米级, 完全可以满足分析需要. D 表示距离海岸线距离, k 表示衰减系数, 可认为是海啸在平地上运行 1 m时浪高降低程度, 它受地表粗糙度、海啸本身特征等多种因素影响. 考察相关观测结果及媒体相关报道, 本次海啸浪高最大达 10 m, 深入陆地数千米的特征, 将系数选定为 1/200. $H+k\cdot D$ 为综合考虑了地形特征与距离海岸距离的受海啸影响的评估结果. 通过一定的变换 f 后, 可量化表达沿岸各处受影响程度. 本次研究采用分段分割的办法, 将 $H+k\cdot D$ 结果以 10 m(浪高最高达 10 m), 30 m(海啸能够波及的相对高差), 100 m(缓冲影响区相对高差)为分割点将沿岸划分为影响惨重区、影响严重区、影响一般区及无影响区. 图 4 为重灾区 3 个县的区域海啸影响程度区划图.

为验证海啸影响程度区划结果的可信度, 选择仙台地区高分辨率遥感影像进行了局部验证. 如图 5(a)所示, 仙台市荒滨位于海啸影响惨重区(红色), 图 5(d)和(e)分别为仙台市荒滨灾前与灾后高分辨率影像, 可以看出该地区遭受了海啸毁灭性的打击. 仙台机场位于海啸影响严重区(黄色), 如图 5(b)和(c)所示, 海啸淹没了机场跑道与大部分建筑, 部分居民躲至高处避难. 表 3 和 4 分别通过叠置分析统计了海啸对各县建筑物和农田的影响结果. 从统计结果可以看出宫城县建筑与农田受海啸影响均较严重.

综合分析地震导致的建筑受损与海啸对沿岸建筑与农田的毁坏可知, 本次地震宫城县遭受的损失极为惨重, 其次为福岛县. 宫城县 76%左右的建筑遭受的地震烈度达 6 度以上(日本烈度表示法), 24%左右的建筑与 12%左右的农田遭受海啸入侵. 除直观受损外, 本文的研究结果为进一步开展经济、社会等方面灾情评估提供科学数据.

日本国土地理院于 3 月 29 号发布了通过航空影像解译得到的重灾区沿岸遭受海啸入侵范围的概况图 (http://www.gsi.go.jp/chirijoho/chirijoho40022.html). 通过对比可以看出本文模拟的海啸侵入结果与航空解译结果范围基本一致(图 6 和 7), 进一步验证了方法与结果的可靠性.

表 2 重灾区各县建筑所处的地震烈度统计信息

日本烈度	岩手县建筑		宫城县建筑		福岛县建筑	
	面积(km^2)	比例(%)	面积(km^2)	比例(%)	面积(km^2)	比例(%)
4 度及以下	30.976	5.243	0.006	0.001	9.564	2.702
5 度弱	93.298	15.793	18.918	2.651	31.207	8.815
5 度强	392.848	66.497	149.793	20.991	114.084	32.227
6 度弱	73.212	12.393	424.100	59.430	136.715	38.619
6 度强	0.437	0.074	118.182	16.561	51.012	14.410
7 度	0.000	0.000	2.612	0.366	11.424	3.227
合计	590.771	100.000	713.611	100.000	354.006	100.000

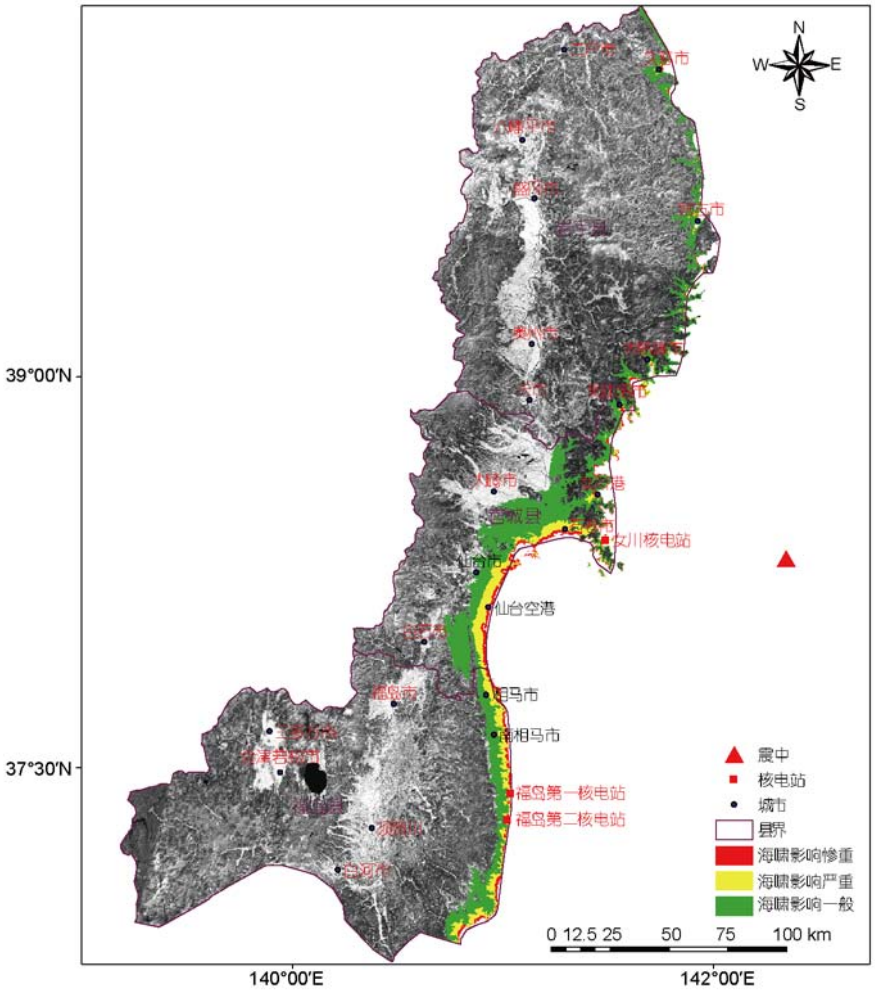

图 4　重灾区海啸影响程度区划图

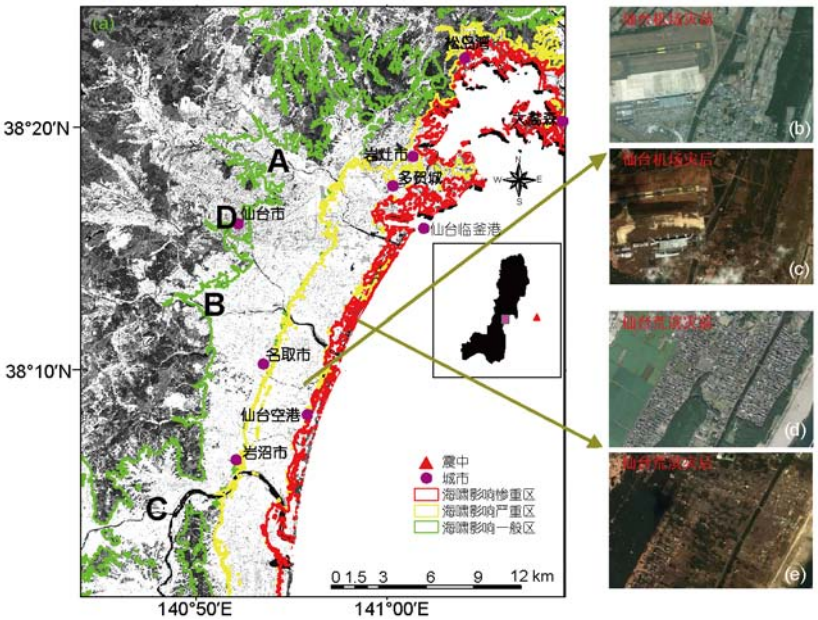

图 5　仙台市沿岸海啸影响程度局部验证结果

(a)为仙台市沿岸海啸影响遥感影像；(b)和(c)为仙台机场灾前和灾后高分辨率遥感影像；(d)和(e)为仙台市荒滨灾前和灾后高分辨率遥感影像；A，B，C 所示区域位于海啸影响一般区(绿色)，包含河流受海啸影响产生倒流区域，部分地区遭受海啸侵入；D 所示位置为仙台市区中心及东部城区，并未遭受海水直接入侵．图中高分辨率遥感影像来自 Google

表 3 重灾区各县海啸对建筑物影响评估统计

影响程度	岩手县建筑		宫城县建筑		福岛县建筑	
	面积(km^2)	比例(%)	面积(km^2)	比例(%)	面积(km^2)	比例(%)
惨重	16.389	2.772	56.088	7.860	16.724	4.724
严重	41.139	6.958	116.146	16.276	37.217	10.513
一般	33.600	5.683	233.350	32.700	51.213	14.467
合计	91.128	15.413	405.584	56.836	105.154	29.704

表 4 重灾区各县海啸对农田影响评估统计

影响程度	岩手县农田		宫城县农田		福岛县农田	
	面积(km^2)	比例(%)	面积(km^2)	比例(%)	面积(km^2)	比例(%)
惨重	4.542	0.250	36.853	1.967	35.105	1.561
严重	22.564	1.241	180.542	9.637	135.692	6.035
一般	37.509	2.063	557.290	29.747	223.037	9.919
合计	64.615	3.554	774.685	41.351	393.834	17.515

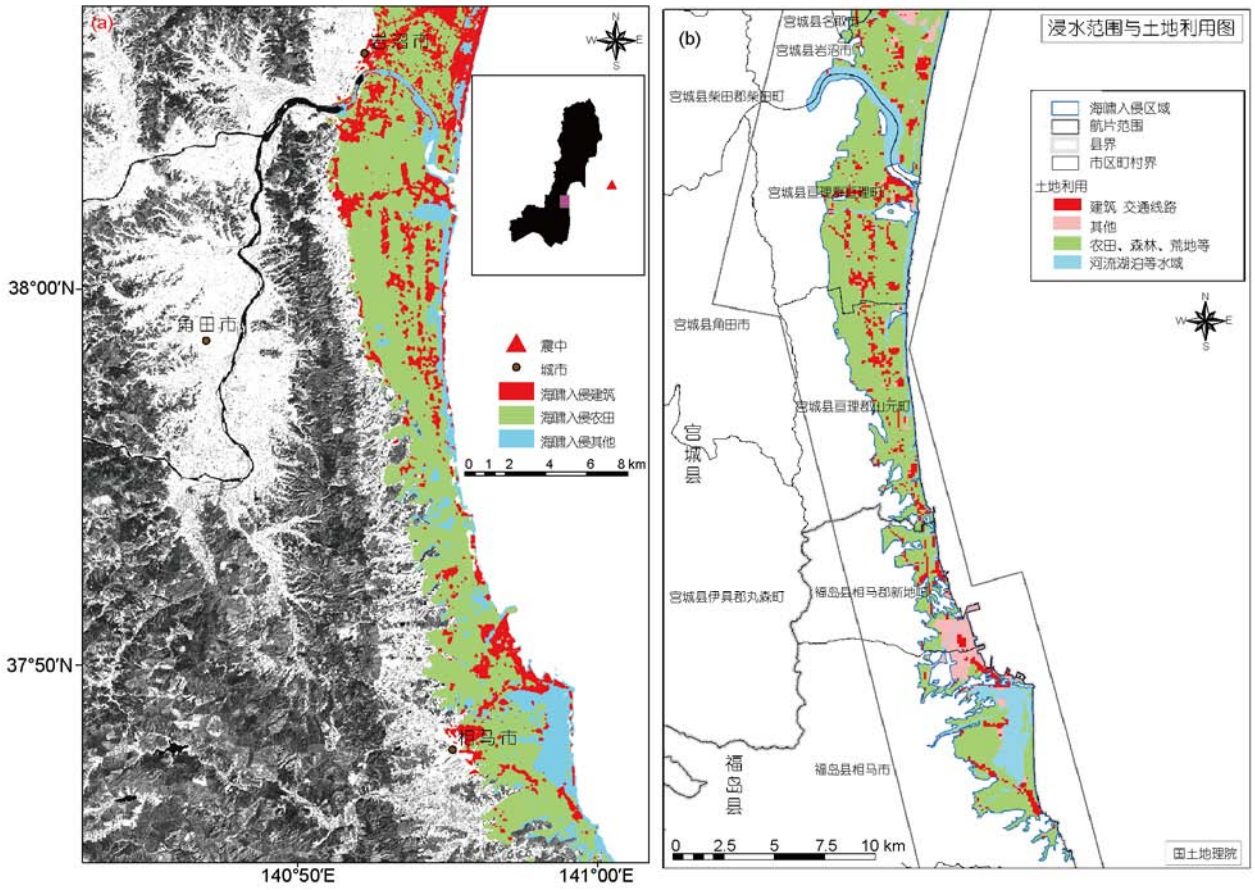

图 6 岩沼市-相马市沿岸海啸入侵模拟结果与航空解译结果对比

模拟结果图(a)与航片解译结果图(b)受损情况基本一致但范围稍大. (b)修改自日本国土地理院发布信息 (http://www.gsi.go.jp/chirijoho40022.html)

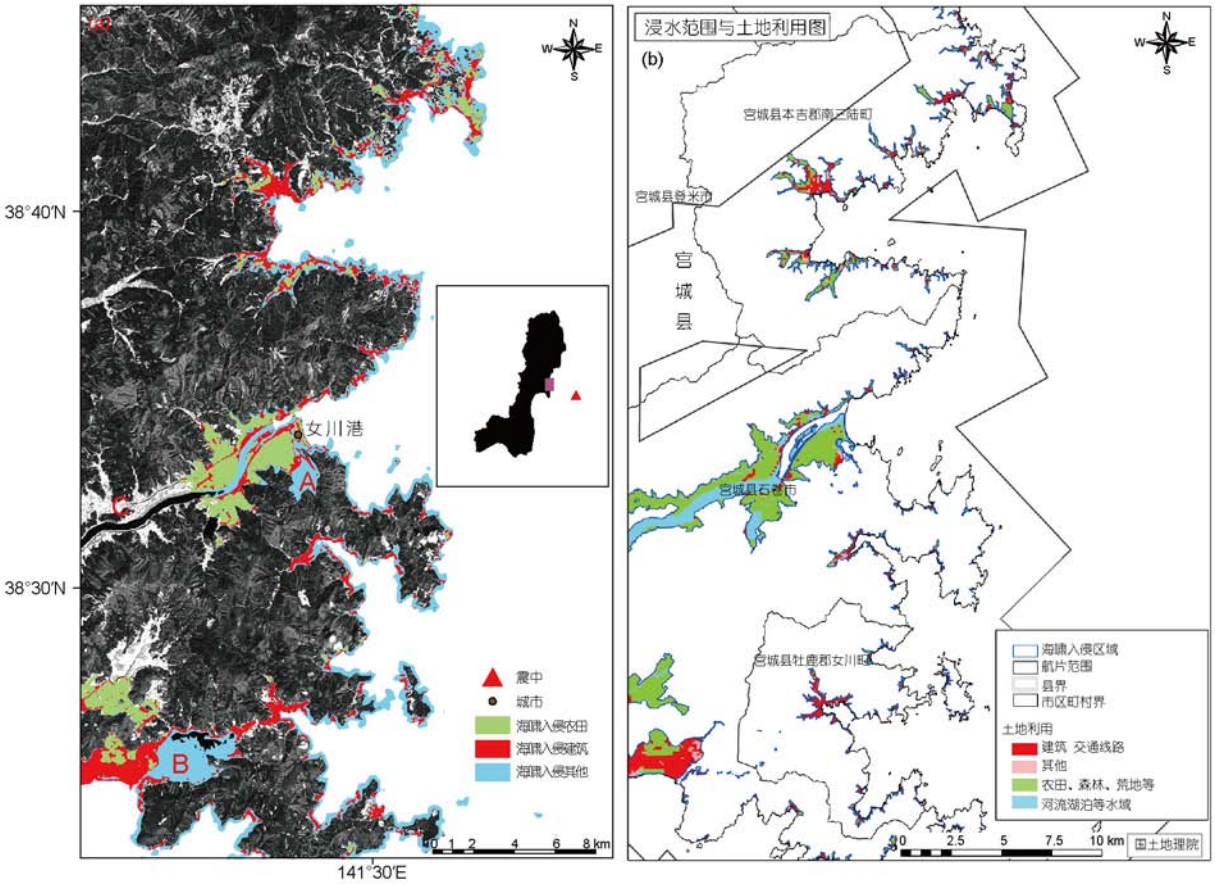

图 7　女川港附近沿岸海啸入侵模拟结果与航空解译结果对比

模拟结果(a)中 A 和 B 所示区域在航片解译结果(b)中没有解译为海啸入侵区是因为这两处是几乎封闭的内陆湖; C 为由于海水倒流而影响的区域, 位于模拟结果的海啸影响一般区范围内, 二者并不冲突. (b)修改自日本国土地理院发布信息(http://www.gsi.go.jp/chirijoho40022.html)

参考文献

1　Chen L-Q, Wang L, Yuan L-S. Analysis of urban landscape pattern change in Yanzhou city based on TM/ETM+ images. Proced Earth Planet Sci. 2009, 1: 1191–1197

2　Xiao J, Shen Y, Ge J, et al. Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China, by using GIS and remote sensing. Landsc Urban Plan, 2006, 75: 69–80

3　姜敦超. 日本新地震烈度表. 安徽水利科技, 1999, 1: 63–64