

JGR Solid Earth

研究文章

10.1029/2020jb020108

关键点。

- 我们提出了一个创新的鲁棒卫星技术版本，能够减少假阳性热异常的扩散。
- 卫星热异常与 M 之间的非惯常关系JMA在2005-2015年的时间跨度中发现了6次影响日本的地震
- 多参数方法可以加速建立一个与时间有关的地震灾害评估系统

© 2021.美国地球物理学会。保留所有权利。

支持信息。

- 支持信息S1

通讯员






N.Genzano,
nicola.genzano@unibas.it

引用。

Genzano, N., Filizzola, C., Hattori, K., Pergola, N., & Tramutoli, V. (2021)。从MTSATS观测到的热红外异常与日本发生的大地震（2005-2015）之间的统计相关性分析。《地球物理学研究杂志》。Solid Earth, 126, e2020JB020108. <https://doi.org/10.1029/2020JB020108>

2020年4月29日收到
2020年12月28日接受

从MTSATs观测到的热红外 线异常与日本 发生的大地震 (2005-2015) 之间的统计相 关性分析

N.Genzano ^{1,2}, C. Filizzola ³, K. Hattori ^{2,4}, N. Pergola ³, 和 V. Tramutoli ¹

¹意大利波坦察巴西利卡塔大学工程学院,²
日本千叶大学理料研究生院,³
意大利波坦察Tito
Scalo国家研究委员会环境分
析方法研究所,⁴
日本千叶大学环境遥感中心
。

摘要

ature经常报告不同种类的非地震学（即地球物理、地球化学和大气）参数的异常变化与地震发生的时空关系。将这些观察结果与地震学观察结果结合起来，可以改善在中短期内（几个月到几天），地震灾害评估的质量。原则上，每个考虑的参数都有其提供关于地震过程的有用（和可利用）信息的能力。因此，要定义一个基于不同观测值的系统，第一步就是要估计每个被考虑的参数可以提供的信息贡献。在本文中，我们将评估重大热异常序列（SSTA）的潜力。特别是，我们采用了广泛使用的Robust Satellite Techniques（RST）数据分析方法来识别日本上空MTSAT卫星获取的11年（2005年6月至2015年12月）夜间卫星图像中的SSTA。为了降低假阳性率，我们引入并测试了RST的创新配置，即在此提出。我们对SSTA和日本地震之间的相关性进行了分析，其中包括

MJMA 6，通过应用有关空间、时间和量级的适当限制。该分析强调(a)在11年的观测期内，仅有29个SSTA的发生，(b)18个SSTA（即62%）的发生与地震有明显的时空关系，(c)其中13个发生在地震前。基于误差图的随机测试分析结果，证实了"基于RST的卫星热异常"与地震发生之间存在非偶然的相关性。特别是，对于MJMA 6.5地震，与随机猜测相比，概率增益高达4.3以上。

1. 简介

到目前为止，大多数致力于提高我们对地震准备阶段的认识的研究，都是基于对单一（地震学、地球化学、生物学等）观测指标的研究。大量的科学文献记录了这些参数的异常时空瞬变的发生，这些参数显然与地震准备阶段有关（例如见Cicerone等人，[2011](#)；Jiao等人，[2018](#)；Tronin，[2006](#)）。然而，没有给出关于在运行中的地震预报（OEF）系统的背景下，将这些观测数据转化为实际有效的方法的可能性（在预测的精确性和可靠性方面）（也见Geller，[1997](#)，和其中的参考文献）。多参数概率方法，致力于提高地震灾害短期预测的质量（而不是提供未来地震的精确预测），今天似乎是最有前途的观点（例如，Genzano等人，[2020](#)；Tramutoli和Vallianatos，[2020](#)）。为此，专门对每个候选参数的"预测"潜力进行的初步研究具有根本的重要性。从长期的相关分析开始，他们可以为每个参数提供在一个明确的区域A和时间段Δt内发生震级大于M的地震的概率P（Δt，A，M）。在此基础上，可以确定多参数系统中每个参数的权重，专门用于动态估计地震灾害。这样的研究应该调查整个观测数据集，同样解决已实现的成功率（即有多少异常是由地震引起的），以及假阳性率（即有多少异常没有由地震引起）。

表1
在不同研究中进行的长期统计分析

参数	暂时性的 覆盖面	研究的地区	地震震级	参考资料
电离层F2峰值的等离子体频率foF2	1994-1999	台湾	M 5	Liu等人 (2006)
由DEMETER记录的电离层离子密度 ^a	2004-2010	世界	M 4.8	M.Li和Parrot (2013)
从GIM-TEC地图中得出的电离层电子密度	2000-2010	世界	M 6	Le等人(2011)
	1998-2010	日本	M 6	Kon等人 (2011)
	2003-2012	世界	M 7	Zhu等人 (2014)
	1998-2014		M 5	Shah和Jin (2015)
	2000-2013	中国	M 5	Ke等人(2016)
	2000-2014	世界	M 6	托马斯等人 (2017)。
来自地面GPS接收机的TEC	2003-2014		M 6	Zhu等人(2018)
亚电离层VLF/LF扰动	2001-2007	台湾	M 5	Liu等人 (2010)
大气层的灯光和发光现象	2001-2007	日本	M 6	Hayakawa等人 (2010)
地球的出射长波辐射	1993-2004	台湾	M 5	Liu等人 (2015)
地球的热辐射	2009-2019	台湾	M 6	Fu等人 (2020)
	2004-2013	希腊	M 4	Elefteriou等人(2016)
	2002-2018	四川 (中国)		Zhang and Meng (2019)
	2004-2014	意大利		Genzano等人 (2020)
超低频地磁场	2001-2010	日本中部	M 4	Han等人 (2014, 2017, 2020) ; Hattori等人 (2013)。
ECMWF气候学再分析数据				Piscini等人(2017)
GPS测量的地面变形	1994-2016	意大利中部	M 5	
	2004-2008	北岛, 新西兰	M 5.1	T.Wang等人 (2013)
	1999-2009	南加州	M 4.7	
	1997-2010	日本中部	M 5.5	

^a完整的缩略语列表见表S5。

表1报告了在世界各地不同地区已经分析过的长期(>5年)的参数清单: 这些研究的结果对于在一个系统内(基于不同种类的参数)确定合适的参数以进行地震灾害评估至关重要。

自80年代以来, 热红外(TIR)卫星传感器在10-14微米光谱区记录的地球热辐射的异常波动被认为与地震准备过程有关(见Tramutoli, Corrado, Filizzola, Genzano, Lisi, & Pergola, 2015, 以及其中的参考文献)。

其中, 由Tramutoli (1998年, 2007年)提出的名为Robust Satellite Techniques (RST)的方法, 在区分可能与地震活动有关的TIR异常变化和由其他影响引起的TIR信号变化方面表现得最好(见Tramutoli等人, 2005年)。RST方法已被应用于世界不同的地震活跃地区, 分析极地和静止平台上的TIR传感器收集的卫星图像的时间序列(见Tramutoli, Corrado, Filizzola, Genzano, Lisi, & Pergola, 2015; Tramutoli等人, 2018, 详细回顾)。

此外, 独立研究小组(如Akhoondzadeh, 2013; Bellaoui et al., 2017; Khalili等人, 2019; J. Li等人, 2007; Mukhopadhyay等人, 2021; Xiong等人, 2013), 以及国家空间机构如DLR(见Halle等人, 2008)和NASA(见Eneva等人, 2008)。特别是, 最后一个承认RST是"检测震前热异常的更好方法"。

为了解释TIR异常的出现, Tronin (1996)、Qiang等人 (1997) 和Tramutoli等人 (2013) 建议将本地温室气体效应作为一个可能的模型。众所周知, 气体, 如CO₂ 和CH₄, 对太阳辐射相当透明, 并能积极吸收地球的发射的红外辐射。在局部范围内, 它们可以充当温室气体, 因为它们允许太阳辐射到达并温暖地球表面。同时, 它们通过吸收和重新发射(朝向表面) 地球发射的红外辐射, 与地球表面的冷却形成对比。因此, 地球表面和近地面的大气层可以试验性地升温, 甚至在远离气体源的地方也可以观察到, 这取决于排放气体的原始浓度和当地的风向制度。Tramutoli等人 (2009年, 2013年) 模拟了近地表的TIR辐射(以亮度温度测量), 预计是CO₂ 混合比增加的结果, 从正常值的2到20倍。在CO₂ 混合比仅增加2-3倍的情况下, TIR发射辐射(亮度温度高于10K) 得到了相当大的增加。相比之下, 在大地震发生时, 已经观察到CO₂ 排放的增加, 其数量级更大(例如, Barka, 1999; Bonfanti等人, 2012; Chiodini等人, 2011)。此外, 众所周知, 在发震断层旁边可以发现异常数量的光学活性气体, 如CO₂ 和CH₄ (例如, Irwin & Barnes, 1980; Tamburello等, 2018)。事实上, 广泛的微裂缝形成过程支持这种脱气活动的增加, 这是持续增加的应力场的结果。这一过程可以通过深水上升和向地表的对流热流来加速, 从而使裂缝闭合/打开, 伴随着整个(前和后) 地震发生过程(例如, Scholz等人, 1973)。同样地, TIR异常也会在地震前后出现。Izmit地震事件(1999年8月17日; M_s = 7.8) 就是这种情况的一个明显例子。事实上, Barka (1999) 和Tramutoli等人 (2005) 分别发现, 从主震前几天到主震发生后若干天, 都有强烈的脱气活动和卫星TIR异常。对于2009年4月6日的M_w 6.3 L'Aquila地震, 在意大利亚平宁半岛中部直接通过地面和间接通过卫星数据分析报告了类似的TIR和CO₂ 气体排放变化(Bonfanti等, 2012; Genzano等, 2009; Heinicke等, 2011; Lisi等, 2010; Martinelli等, 2020; Pergola等, 2010)。Lucente等人 (2010) 根据地震波速度分析提出的流体迁移模型也支持这些观察结果。值得注意的是, 变形过程在调节温室气体排放方面的作用取决于当地的构造(例如, 见Doglioni等人, 2014年, 以及其中的参考文献) 和地球化学环境, 这并不允许我们做出概括。

无论如何, 上述模型并不排除其他提议的过程可能有助于观察到的热异常。其中, 我们应该提到Freund (2007) 的模型, 他将TIR异常解释为受压岩石中正孔对激活的结果, 以及Pulinets和Ouzonov (2011) 的模型, 他们认为TIR异常的发生是近地表空气因密集氮排放而电离的预期后果之一。

在本文中, 我们研究了日本领土范围内基于RST的地震TIR异常情况。我们分析了从2005年7月到2015年12月(11年) 分别由MTSAT-1R和-2地球静止平台上的卫星传感器JAMI和IMAGER获取的日本上空的TIR卫星记录。为了最大限度地减少假阳性的发生, 我们在这里首次提出了一个RST-操作的安排及其验证。我们将讨论卫星TIR异常与日本境内发生的地震的时空距离和震级(M_{JMA} 6) 的相关分析结果, 研究多参数系统的设置, 以评估地震灾害的时间相关性(t-DASH; Genzano等人, 2020; Tramutoli等人, 2014)。

2. 数据和方法

通过分析MTSAT-1R卫星上的JAMI传感器在2005年6月至2010年期间以及MTSAT-2卫星上的IMAGER传感器在2010年7月至2015年12月期间以10.8微米(10.3-11.3微米) 获取的所有夜间(00:30 LT; 即15:30 UTC-1天) TIR图像, 确定了热异常。这些图像属于千叶大学CEReS提供的空间分辨率为0.04°的网格化数据集。

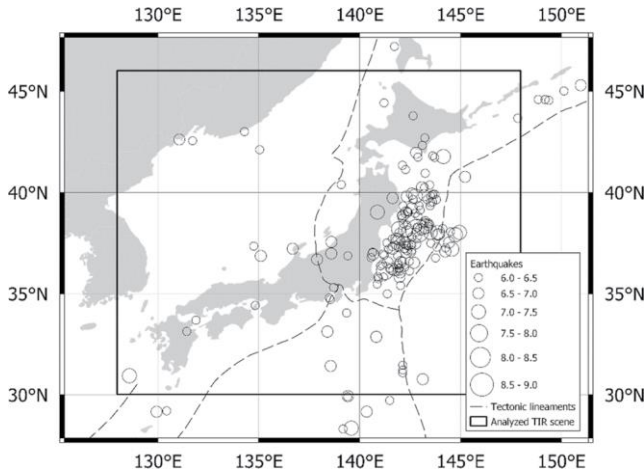


图1.调查的区域。矩形的黑色实线包含了MTSAT TIR场景的分析区域；圆圈表示地震。与 M_{JMA} 6发生在2005年6月15日至2016年1月31日，在27°N-49°N和125°E-151°E的广泛区域内。

图1显示了调查区域（北纬30-46°，东经128-148°），该区域涵盖了日本领土。这里还显示了2005年6月15日至2016年1月31日期间，在比调查区域大3°的区域内发生的地震。根据日本气象厅的地震目录（日本气象厅，2021年），有229次 M_{JMA} 6和79次 M_{JMA} 6.5的事件，发生在所考虑的时间段和选定的地理区域。

Tramutoli（1998年，2007年）提出的RST方法使我们能够识别可能与地震发生有关的TIR异常现象。这种变化检测方法的本质是，当信号的变化与它的“正常”行为有很大差异时，就被认为是“异常”的。这种行为是通过利用来自卫星同质（即相同的传感器、一天中相似的时间和一年中相同的月份）图像的时间序列的所有信息来估计的。对RST方法的准确描述可以在Eleftheriou等人（2016）中找到。

在这项研究中，为了识别TIR异常，我们使用了基于统计学的TIR异常估计器（RETIRA；Filizzola等人，2004；Tramutoli等人，2005）指数，在Genzano等人（2020）中称为RETIRA_{box}，它由以下表达式计算（公式1）。

$$\Delta T_{box}(x, y, t) = \frac{\Delta T_{box}(x, y, t) \Delta T_{box}(x, y, t) \Delta T_{box}(x, y, t)}{\Delta T_{box}(x, y, t) \Delta T_{box}(x, y, t) \Delta T_{box}(x, y, t)} \quad (1)$$

其中

- (x, y) 是对应于像素中心的地理坐标。
- t 是卫星采集时间， $t \in \tau$ ，即 τ 为时域，包括2005年6月至2015年12月在00:30 LT采集的所有夜间MTSAT图像。
- ΔT_{box}
 (x, y, t) 是以位置 (x, y) 为中心的3×3像素区域内 $\Delta T(x, y, t)$ 的空间平均值。它的计算只有在方框内至少有55%的像素是清晰的，并且不靠近云层（无云方框）时才会进行。单通道多云辐射检测方法（OCA；Cuomo等人，2004）算法识别多云像素。
- $\Delta T(x, y, t) = T(x, y, t) - T(t)$ 是TIR亮度温度的标点值之差
 $T(x, y, t)$ 和日空间平均值 $T(t)$ 。应该强调的是， $T(t)$ 的计算只考虑了整个调查区域的无云值，这是相同类别的一部分（即，只有海或陆地像素，如果 (x, y) 分别在海上或陆地上）。
- $\Delta T_{box}(x, y, t)$ 和 $\Delta T_{box}(x, y, t)$ 是在属于所选数据集（ $t \in \tau$ ）的无云盒上计算的 $\Delta T_{box}(x, y, t)$ 的时间平均值和标准偏差值。

选择使用 ΔT_{box}

(x, y, t) 应该减少由于零星的和空间局部的事件（例如，由于火灾或工业事故）而出现的虚假的TIR异常，并保留和强调那些具有明显的空间扩展的异常，正如预期的可能与地震准备阶段有关的TIR异常。

我们在这里采用了Eleftheriou等人（2016）提出的改进的RST预处理阶段，以减少气象云对参考场计算可能产生的负面影响和随之而来的可能的假阳性的扩散。事实上，在日本这样的地理环境中，这种影响可能是特别重要的，因为在一个相对较小的土地范围内有各种气候条件。此外，它还受到一些现象的影响，如夏季和初秋南部的季风，8月至10月太平洋地区的台风，以及日本海北部鄂霍次克海的大气压力影响。

因此,对于一年中的每个月,我们计算了两张图像 (ΔT_{box} 和 ΔT_{box} 图像),作为"参考图像"(即RST参考场)用于计算RETIRA_{box}指数。它们代表了预期的热条件。

利用这些参考场,我们计算了所有MTSAT-1R/2 TIR图像(即2005年6月至2015年12月期间的3747幅)的热异常图(TAM);TAM报告了所有无云位置的 $\otimes T_{\text{box}} \xi_{\xi, y, t}$ 的值。从现在开始,我们将那些具有以下特征的地点视为热异常(TAs):1. $\otimes T_{\text{box}} \xi_{\xi, y, t} 3.5$ -也就是说,用信号过剩的 $\Delta T_{\text{box}} x, y, t \Delta T_{\text{box}} x, y, t 3.5 \Delta T_{\text{box}} x, y, t$ 。

与之前的研究一样(见Tramutoli, Corrado, Filizzola, Genzano, Lisi, & Pergola, 2015; Tramutoli等人, 2018, 以及其中的参考文献),我们在将TAs限定为重大热异常(STA)之前,对其进行了初步的时空持续性分析。事实上,从统计学的角度来看,RETIRA_{box}指数可能会暴露在大量的信号异常值中(见Tramutoli等人, 2005)。Aliano, Corrado, Filizzola, Genzano, et al. (2008), Aliano, Corrado, Filizzola, Pergola, et al. (2008), Filizzola et al. (2004), and Genzano et al. (2009)报告了由特定自然和观测条件引起的TIR异常的例子。在所有情况下,这些TAs都显示出特定的空间分布和在时域中的短命特征。这些特征使我们能够将它们与空间和时间上持续存在的TAs区分开来,后者可能与即将发生的地震事件有关。所以,只有在有限的时空域中持续存在的STA才能属于重要的热异常序列(SSTA)。

正如Eleftheriou等人(2016)、Genzano等人(2015, 2020)和Tramutoli, Corrado, Filizzola, Genzano, Lisi, Paciello等人(2015)所讨论的,当满足以下要求时,SSTA就发生了。

- **相对强度。**TA的值应该是 $\otimes T_{\text{box}} \xi_{\xi, y, t} K$ (在本文中, $K=3.5$)。
- **摒弃虚假效应。**在TAMs的场景(即陆地或海洋)中,有大量的云层、导航错误(Filizzola等人, 2004)和已知的虚假效应(见Aliano, Corrado, Filizzola, Genzano, et al., 2008; Eleftheriou等人, 2016; Genzano等人。关于云层,在本研究中,我们只考虑场景中云层像素的比例低于属于同一陆地/海洋类别的80%的部分是有用的。
- **最小空间延伸。**每个STA必须在 $1^\circ \times 1^\circ$ 的区域内覆盖至少150公里的面积²。围绕 (x, y) 。
- **时空领域的持久性。**STA之间最大距离为 1° (空间持久性),在 t 之前/之后的7天内至少再出现一次(时间持久性)。

图2(a)是SSTA的一个例子,2013年10月18-

19日出现在太平洋海域。尽管两张TIR图像都显示了南部地区的云量,但突出的TIR异常并不是由于寒冷的空间平均效应(Aliano, Corrado, Filizzola, Genzano, et al., 2008; Genzano et al., 2009),正如图2(b)中报告的云量覆盖分析所证实的。

3. 数据分析

3.1. 地震目录过滤

我们考虑到在研究地区/时期内发生的 $M_{\text{JMA}} 6$ 的地震事件,进行了以下章节的相关分析。正如Michael (1997)所强调的,地震集群可能对结果有影响。与那些旨在评估地震危害的研究(如地震学)不同,地震目录的解聚是一个基本的初步分析,其质量可能影响后续分析的结果,基于非地震学参数的研究受地震解聚方法的影响较小。

在这项研究中,我们采用了特定的标准来选择相关分析中考虑的地震。由于相邻地区在一个时间跨度 t_s 内可能发生不止一次地震,对于在 t_s 内发生的每个地震事件。

(a) 我们计算了相应的Dobrovolsky半径(Dobrovolsky等人, 1979),其中 M_i 是第 i 次地震的震级。

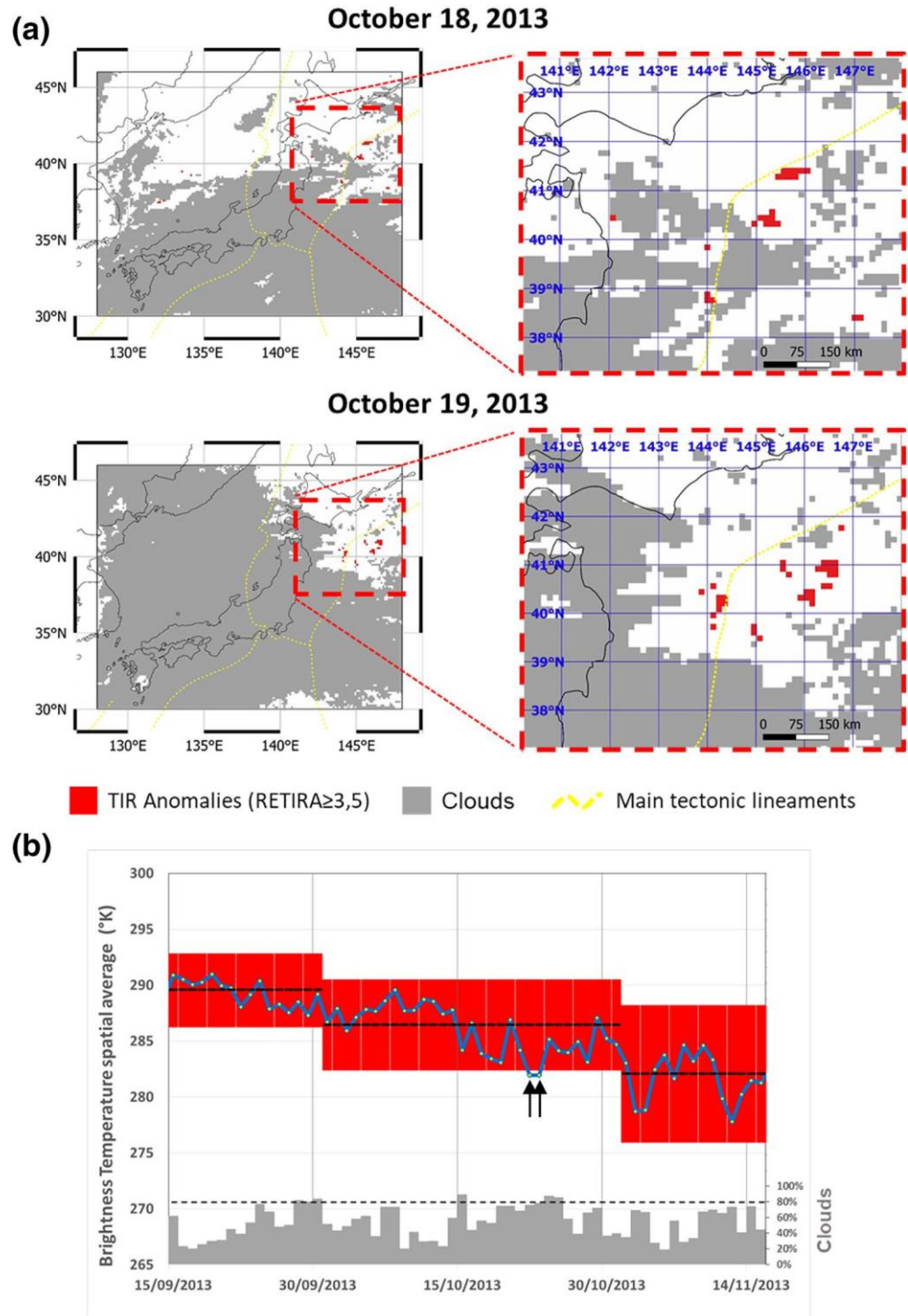


图2. (a) 2013年10月18日和19日在太平洋上空出现的STA有明显延伸（即至少150公里²）并有时空持续性的TAM。(b)

有必要进行分析，以确定由气象影响引起的TAs。黄色圆圈表示根据无云像素计算的海面上的日空间平均值 $T(t)$ ；黑线表示时间平均值(μ_T)；红色区域定义了 $\pm 2\sigma_T$ 界限，用于排除受冷空间平均值效应影响的图像(如黑色箭头所示的图像)，这些图像是通过使用2005-2015年期间同一月份的所有图像计算的；灰条表示场景中海面部分的云量百分比。TAMs，热异常图；STAs，重要热异常；TAs，热异常。

- (b) 我们按照事件的大小和发生时间的递增进行排序。
- (c) 从列表中的第一个事件开始，我们排除了所有落在其Dobrovolsky半径内的事件。
- (d) 我们对列表中所有幸存的事件重复这一过程，直到所有的事件都被评估过。辅助资料中的图S1显示了一些例子。

在这项研究中，我们产生了两个不同的过滤目录。

- 每日过滤的目录，其中 $t_s=1$ 天。我们用这个目录初步评估了传统的RST分析和它的优化安排之间的比较性能，在此提出。这个过滤的目录包括157个 M_{JMA} 6的事件和58个 M_{JMA} 6.5的事件。
- 月度过滤目录，其中 $t_s=\pm 30$ 天。我们用这个目录来评估是否有高地震性的日本地区的事件可能会影响有关RST优化安排的结果。这个过滤的目录包括82个 M_{JMA} 6的事件和35个 M_{JMA} 6.5的事件。

3.2. 基于TIR RST的异常现象与地震 (M_{JMA} 6) 发生的相关性分析

我们将上述规则应用于2005年6月至2015年12月期间的所有MTSAT TIR图像，并确定了60个SSTA（分布在132个不同的TIR图像中，即占有可用TIR图像的3.5%）。

我们评估了SSTA的出现与属于每日过滤目录的地震的位置、时间和震级之间可能的相关性。为了达到这个目的，我们应用了经验规则，这些规则是在考虑到以前的研究（见Tramutoli, Corrado, Filizzola, Genzano, Lisi, & Pergola, 2015; Tramutoli et al., 2018, and references therein）和迄今为止提出的解释大地震前后TA出现的物理模型（如Tramutoli et al., 2013）后建立的。此外，定义的验证规则，应驱动回顾性的相关分析，与CSEP项目（Schorlemmer等人, 2018）使用的规则相匹配。

按照这样的规则，我们认为在一个地理位置(x,y)上观察到的每个STA，在时间 t 上，属于先前确定的SSTA，与M6的地震事件相关，如果它发生在规定的范围内。

- 时间窗口，即在（震前异常）最后一次出现TA后30天内，或直到（震后/地震异常）第一次出现TA前15天，以及
- 空间窗口，即与形成SSTA的TA的距离 R_D 内，其中 $R_D = 10^{0.43M}$ ，即Dobrovolsky半径（Dobrovolsky等人, 1979）。

图3显示了应用规则的示意图。对于2013年10月18-19日的SSTA，为验证TA和地震事件之间的可能关系，对不同级别的地震震级定义了一个时空体积（这里只有M6和6.5是用不同颜色画的）。满足上述定义的地震为红点。在这种情况下，2013年10月18日和19日出现在日本东北海岸的STA，之后发生了一次震级为7.1.它发生在太平洋上TA首次出现的8天后（即2013年10月26日）。

在此基础上，对所使用的MTSAT TIR数据集上确定的SSTA（即60个）应用上述相关规则，分析强调50%的SSTA在空间和时间上与地震 (M_{JMA} 6) 明显相关，50%不相关（假阳性）。我们应该强调，不可能在一个SSTA和同一天发生的特定地震之间建立一对一的联系；在大多数情况下，所考虑的参数的预测能力只能在集体意义上进行判断（Nakatani, 2020）。

3.3. 减少假阳性TIR异常的发生

在本文中，新应用的RST分析采用了不同的标准来建立TIR卫星图像的历史数据集，以降低假阳性发生的数量。到目前为止，在以前的RST应用中，我们计算RST参考图像（即时间平均值和标准差

) 时使用的是

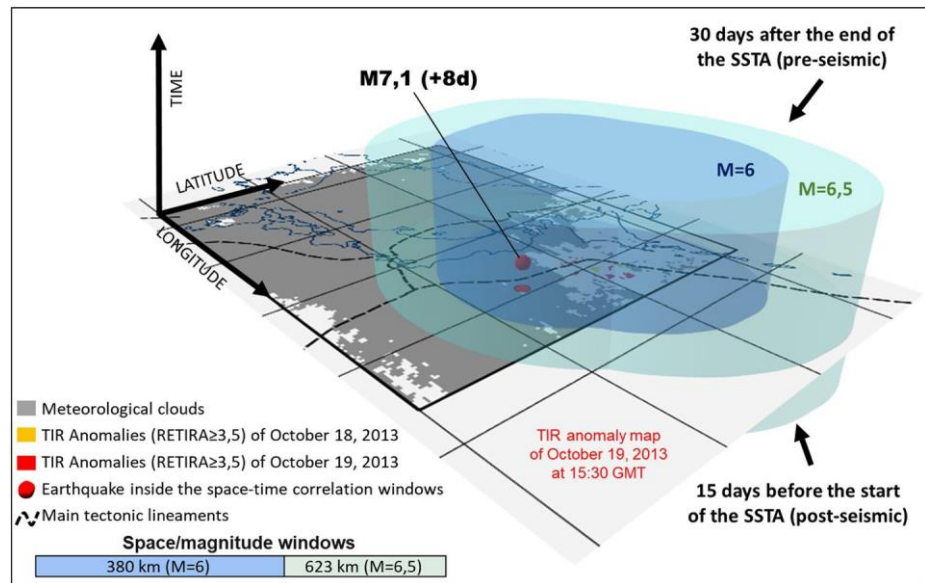


图3.应用相关规则的示意图。确定的SSTA（2013年10月18日和19日）周围的彩色圆柱体代表不同震级的警报时空量（详见正文）。除了10月19日的STA（用红色像素表示），10月18日的STA（用橙色像素表示）也被叠加到2013年10月19日的TIR异常图上。红球（其投影在图中）表示相关规则内的地震，标签表示其震级和与第一个STA出现（即2013年10月18日）的时间距离（以天为单位）。SSTA, Significant Sequence of Thermal Anomaly; STA, Significant Thermal Anomalies; TIR, Thermal InfraRed.

由同一日历月收集的记录建立的TIR图像的历史数据集（固定月窗口标准，FWC）。因此，对于每个月，我们产生了两个图像（ μ 和 σ ），用来识别TIR异常。对于一个月中的大部分日子（即月中的那些日子），这两幅图像非常能代表预期的（即正常的）情况，特别是对于长的、均匀的、密集的TIR卫星记录的时间序列。然而，在特定情况下（例如，气象因素的突然变化或一个月内无云场景的可用性差），月度参考图像可能不适合代表从一个月的第一天和最后一天可能发生重大变化的条件。因此，在月初和/或月末（根据季节不同，一个月的其他时间通常更冷/更暖），以及在使用不充分丰富的历史数据集计算参考场时，TIR异常可能激增，其影响可能特别大。

在本文中，我们提出了一个不同的标准来计算RST参考场。我们没有使用FWC，而是在每年的每个分析日周围使用30天的时间窗口（即 ± 15 天）（移动窗口标准，MWC）来建立（ 366×2 而不是 12×2 ）参考场。通过这种方式，我们计算了732幅参考场图像（一年中的每一天都有两幅， μ 和 σ ），而不是24幅月度参考场图像（一年中的每一个月都有两幅， μ 和 σ ）。这使我们能够将TIR记录与最合适的参考场进行比较。在一年中的某些地理区域和时期，这种选择可以大大减少发生在月初/月末的热异常现象的扩散。沿着上述步骤，我们对SSTA和属于每日过滤目录的地震进行了新的相关分析。使用以前用于评估RST_{FWC}性能的相同目录，使我们能够更好地判断RST_{MWC}所实现的改进，因为与RST相比，FWC。

这项新的分析强调，在日本地区2005年6月至2015年12月期间，29个已识别的SSTA（在这种情况下，分布在69个不同的TIR图像中，即占全部可用TIR图像的1.8%）中，有62.1%显然在空间和时间上与报告的地震事件有关（ M_{JMA} 6，表2）。

表2
相关性分析的总结

同上	科技厅地点	SSTA期间	SSTA类型	在与EQ相关的方面	EQ量级的JMA和从第一个+最后一个TIR异常点出现的时间滞后（天数）
1	北海道	2005年12月20日至2006年1月13日	POST EQ	Y	6.1 (-3 ÷ -27)
2	中国	2005年12月23-24日		N	
3	中部地区	2006年1月25日至31日		N	
4	北日本海	2006年1月19-20日		N	
5	俄罗斯南部	2007年2月4日至8日	PRE EQ	Y	6.2 (+33 ÷ +29)
6	四国	2007年3月29-31日	POST EQ	Y	6.9 (-4 ÷ -6)
7	中部地区	2008年5月27日至29日	PRE EQ	Y	7.2 (+18 ÷ +16)
8	俄罗斯南部	2008年11月6-7日		N	
9	北海道	2009年1月14日至29日		N	
10	俄罗斯南部	2009年1月27日至29日		N	
11	东北海道近海	2009年2月14-15日		N	
12	中部地区	2009年11月9日至15日		N	
13	韩国	2009年11月13-14日	POST EQ	Y	6.8 (-14 ÷ -15)
14	九州	2010年2月8日至10日		N	
15	东北海道近海	2011年2月4日至10日	PRE EQ	Y	7.3 (+33 ÷ +27), 6.8 (+34 ÷ +28), 9 (+35 ÷ +29), 6.8 (+36 ÷ +30)
16	韩国	2011年11月28日至12月1日		N	
17	东北海道近海	2012年4月26日至30日	PRE EQ	Y	6.5 (+24 ÷ +20), 6.1 (+28 ÷ +24)
18	日本海(东北近海)	2012年7月20-21日		N	
19	北海道	2012年9月14日至18日	PRE EQ	Y	6.3 (+18 ÷ +14)
20	关西	3月18-19日, 2013	PRE EQ	Y	6.3 (+26 ÷ +25), 6.2 (+30 ÷ +29)
21	太平洋海	2013年3月23日至26日	PRE EQ	Y	6.2 (+10 ÷ +7), 7 (+27 ÷ +24)
22	关东	4月18-22日, 2013	前置和后置EQ	Y	6.3 (-5 ÷ -9), 6.2 (-1 ÷ -5), 6.4 (+3 ÷ -1), 6 (+30 ÷ +26)
23	日本海(中国近海)	2013年8月20日至26日	PRE EQ	Y	6.8 (+15 ÷ +9)
24	太平洋海	2013年10月18-19日	PRE EQ	Y	7.1 (+8 ÷ +7)
25	东北地区	2015年1月16日至21日	PRE EQ	Y	6.9 (+32 ÷ +27), 6.5 (+35 ÷ -)
26	俄罗斯南部	2015年1月25日至29日	PRE EQ	Y	6.9 (+23 ÷ +19)
27	东北海道近海	2015年3月4日至8日	POST EQ	Y	6.9 (-15 ÷ -19), 6.5 (-12 ÷ -16)
28	四国	2015年11月6日至9日	PRE EQ	Y	7.1 (+8 ÷ +5)
29	中国	2015年11月21日至23日	POST EQ	Y	7.1 (-7 ÷ -9)
			29 SSTA	18 Y 11 N	62.1% Y 37.9% N (针对M 6)
				13 Y 16 N	44.8% Y 55.2% N (针对M 6.5)

对比两个独立的RST分析，应注意的是，减少了。

- SSTA的数量从60个（通过使用传统的RST分析， RST_{FWC} ）到29个（通过使用拟议的创新RST分析， RST_{MWC} ），高亮显示。
- 假阳性的SSTA从30个（相当于所有SSTA的50%）降至只有11个（相当于37.9%）的所有SSTA）。

表3显示了两种RST分析方法的假阳性时空分布的比较。我们应该指出，正如预期的那样，大多数SSTA在气候突变的时期和地理区域消失，如秋冬过渡期(即，

表3
假阳性的时空分布示意图

	中国，俄罗斯南部	北海道，北日本海	东北地区	关东、中部	关西，中国四国	九州	韩国	中日本海	南太平洋海域	本月共计
扬	2 (1)	1 (0)		1 (1)	0 (1)	0 (1)				4 (4)
2月		1 (0)				1 (0)				2 (0)
叁										0 (0)
四月			0 (1)							0 (1)
5月										0 (0)
淳		0 (1)		0 (1)						0 (2)
7月								1 (1)	0 (1)	1 (2)
8月					0 (1)				0 (1)	0 (2)
9月										0 (0)
10月		0 (1)				0 (1)				0 (2)
11月	1 (5)	0 (2)		1 (0)		0 (1)	1 (2)	0 (1)	0 (1)	3 (12)
12月	0 (1)			0 (1)	1 (1)	0 (1)		0 (1)		1 (5)
区域总计	3 (7)	2 (4)	0 (1)	2 (3)	1 (3)	1 (4)	1 (2)	1 (3)	0 (3)	11 (30)

粗体数字表示RST记录的假阳性_{MWC}，而括号内的数字表示RST情况下相应的假阳性_{FWC}。

11月) 在被调查场景的西北地区(即俄罗斯南部)。此外，在东北和太平洋等地区，我们记录到的假阳性现象大大减少(达到零)。此外，在与地震发生相关的SSTA中，RST_{MWC}证实了震前SSTA的主导地位(18个中的13个)(图4)。

我们进行了随机测试分析，目的是评估所取得的结果的质量和"基于RST的卫星热异常"参数对专门用于评估短期地震危险的多参数系统的潜在信息贡献。这种分析还应该强调，如果SSTA(包括事件前和事件后)看起来与地震有关，只是因为所研究地区的高地震率和/或因为所使用的相关空间/时间规则(最终设置得过大)。

我们考虑了Molchan方法(Molchan, 1997年, 以及其中的参考文献)，作为验证基于SSTA的实际值的参考方法，与基于随机的报警函数相比。

在过去，Molchan测试被广泛用作评估基于地震图的地震预测方法的诊断工具。这些地图是利用历史地震目录、地震构造区域化方法、平滑技术等获得的(例如，Molchan, 2012)。这样一种地图代表了一种"参考模型"，它应该反映"当前关于地震过程的知识"(Shebalin, 2018)。应该指出的是，在Molchan图(或误差图)中，参考模型通常被解释为警报所占据的时空区域的一部分(Kossobokov & Shebalin, 2003)，"选择正确的模型是测试中最重要的部分"(Molchan, 2012)。在图中， τ 表示参考模型，它与发生在报警时空区域之外的地震的分数 ν (即缺失率)进行比较。

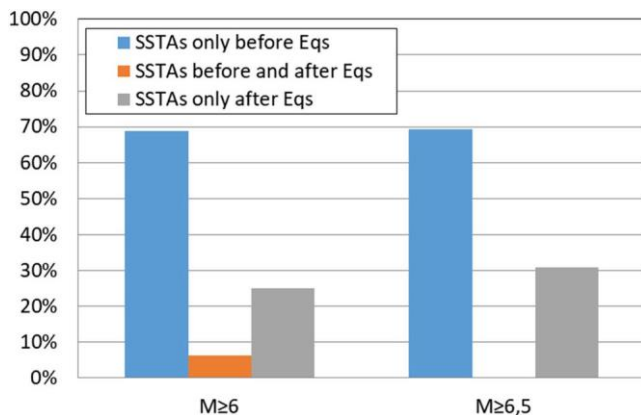


图4.基于RST_{MWC}的SSTA分布与6级和6.5级地震事件的发生率比较。SSTA, Significant Sequence of Thermal Anomaly.

Molchan (1990年, 1991年) 和Molchan和Kagan (1992年) 提出的方法与扩展它的方法相比, 可以认为是一种简单的分析, 例如, 区域技能得分 (Zechar和Jordan, 2008年, 2010年)。此外, Molchan的图表应该在没有观察差距的情况下应用 (在我们的案例中, 由云层代表, 我们无法避免)。尽管有这些考虑, 我们还是根据所研究参数 (即基于RST的SSTA) 的具体特征, 采用Shebalin等人 (2006) 提出的Cus-tomized Molchan误差图, 而不是采用基于似然检验的方法。事实上, 这种测试不能用于具有非概率报警功能的模型 (Shebalin等人, 2014)。

应该指出的是, 报警功能侧重于对未来地震事件的预测识别, 并选择最小震级阈值, 也可用于更复杂的预测 (见Zechar & Jordan, 2008)。相反, 我们的随机测试分析的目的是了解在2005年6月至2015年12月期间, 所识别的卫星热异常与日本地区的地震发生之间是否存在 (或不存在) 非偶然的关系。因此, 可能出现的高漏报地震率不应被视为问题, 因为具体观测方法中固有的缺乏连续性, 并不影响SSTA参数的预测能力。事实上, 我们的目标是通过减少假阳性率, 而不是预测所有地震的发生, 来促进提高每一次预测的可靠性。

在我们的案例中, 误差图绘制了没有SS-TASVEQ (即错过的EQ) 的地震百分比与警报时空体积TSSTA。我们使用表达式2和3计算它们 (详见Eleftheriou等人, 2016,)。

$$\text{弹性} = \frac{\text{在时空相关窗口外有} M \text{ 级的EQ数量}}{\text{在整个时空范围内发生的有} M \text{ 级的EQ总数量}} \quad (2)$$

$$\text{SSTA} = \frac{\text{幅度为} M \text{ 的EQ的警报空间时间量}}{\text{整个被调查的空间时间量}} \quad (3)$$

此外, 我们计算了概率增益 (Aki, 1989) $G = (1 - \text{VEQ}) / \text{TSSTA}$, 以及基于无效假设的置信极限曲线 (详见Kossobokov, 2006), 在随机猜测的对角线周围95%的水平。

图5 (a) 显示了误差图的结果。在这里, 我们还评估了Molchan的分析结果与使用50个合成目录得到的分析结果的比较, 其中事件的位置和量级与每日过滤目录中的相同, 但发生时间是随机产生的 (更多细节见辅助资料中的图S2和S3)。我们的研究结果表明

- 结果处于乐观区, 与随机猜测有 "显著" 偏差 (即置信度为95%)。
- 关于合成目录的结果围绕着随机猜测线 (为了简单起见。我们只报告了平均值, 完整的细节在支持信息中); 不仅是平均值, 还有模拟目录取得的所有结果都在显著水平 $\alpha=5\%$ 下拒绝了无效假设; 以及
- 概率增益达到2 (对于M6级地震前和地震后的SSTA) 至4.3 (对于M6.5级地震的SSTA)。只有地震前的SSTA, 与随机猜测相比。

图5(a)显示, 从事件的角度来看, 警报已经被证明比随机猜测要好, 但为了验证从警报的角度来看是否相同, 我们建立了一个特设的错误图 (图5(b)), 考虑到

$$\text{SSTAM} = \frac{\text{与EQ不对应的SSTA数量, 幅度为} M \text{ 的假}}{\text{在整个时空范围内确定的SSTA的总数量}} \quad (4)$$

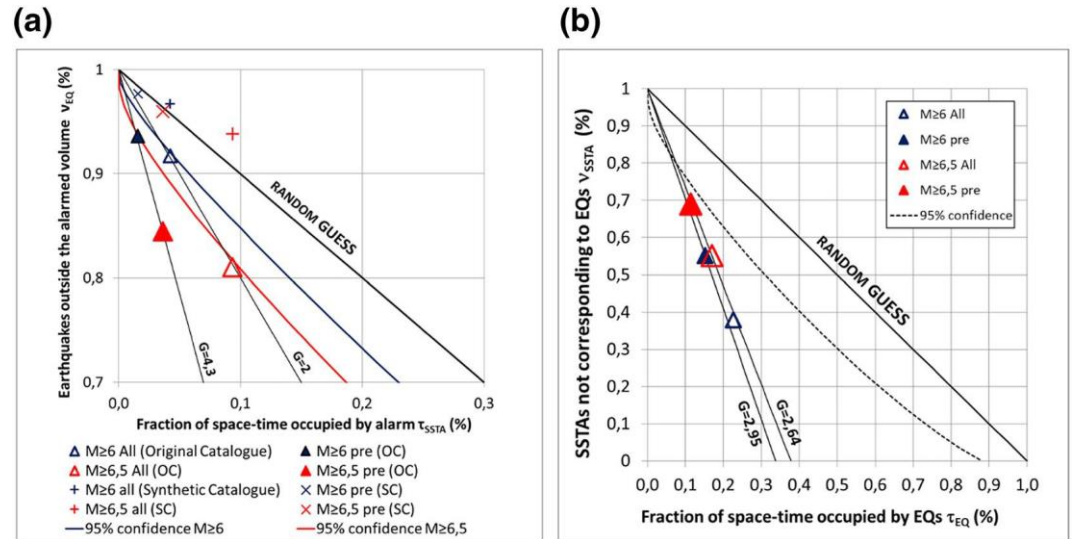


图5.从事件 (a) 和警报 (b) 的角度看, 错误图由RST_{MWC}

在整个研究期间 (2005年6月至2015年12月) 识别。在(a)中, 图表被放大以强调取得的结果。空三角指的是地震事件, 在警报范围内对应于 M_{JMA} 6和6.5, 发生在SSTA出现之后或之前 (震前和震后异常)。完整的三角形仅指SSTA出现后发生的事件 (仅指震前异常)。同样, 蓝色和红色的交叉/加号表示有关使用不同的合成目录进行分析的结果的平均值 (见辅助资料中的表S1)。蓝线和红线分别表示 M_{JMA} 6和6.5的地震的随机猜测对角线周围的置信度曲线。在本研究中, 用95%的置信度来表示与随机猜测函数的 "显著" 偏离。在 (b) 中, 完整的三角形指的是SSTA, 它是后面没有 M_{JMA} 6和6.5的事件。空的三角形指的是没有地震事件跟随或之前的SSTA。虚线表示围绕29个已识别的SSTA的随机猜测的95%置信度。对于这两张图, 都报告了最小和最大的概率收益 (G)。SSTA, 重要的热异常序列。

$$\text{弹性} \quad \text{幅度为 } M \text{ 的 EQ 所占据的空间时间体积} = \frac{V}{V_{\text{整个被调查的空间时间量}}} \quad (5)$$

我们计算了 "幅度为 M 的EQ所占据的空间 \times 时间体积", 考虑到

- 时间窗口: 从地震发生前30天到地震发生后15天 (共46天) 和
- 空间窗口。 $R_D = 10^{0.43M}$, 也就是Dobrovolsky半径 (Dobrovolsky等人, 1979)。

图5(b)强调, 即使从报警的角度来看, SSTA也比随机猜测好。同样对于这个测试, 概率增益被计算为 $G = (1 - v_{SSTA}) / \tau_{EQ}$ 。与随机猜测相比, 获得的数值达到2.95 (对于M6地震之前的SSTA)。

所取得的结果是令人鼓舞的, 即使它们只是代表实际参数性能的最低水平。事实上, 对它们的评估还应该考虑两个主要方面。

- 持续的云层会产生空间/时间上的数据缺口, 因此, 当数据经常 (占总数的65%) 被云层掩盖时, 就会出现很多可能被遗漏的事件, 比如在本研究中。
- 脱气过程在数量、地球化学种类和通量率方面都会有很大的不同, 例如, 在脱气过程中的通量率是多少?

这取决于当地的地质构造环境以及地球化学/岩石学特征; 因此, 可以认为, 由于脱气活动的存在/强度各不相同, 并非所有事件之前/之后都有TIR异常现象。

此外, 为了验证地震群的存在是否会影响所取得的结果, 已确定的SSTA (即29个序列) 与地震事件之间可能存在的关系。

在考虑到按月而不是按日过滤的目录的情况下进行了验证。这种相关性分析表明，18个SSTA中的17个（以前强调与 M_{JMA} 6的事件有明显的时空关系）仍然与地震有时空关系（见辅助资料表S2中的摘要）。

与之前所做的类似，在建立误差图时，既考虑到了每月提交的目录，也考虑到了从它开始生成的合成目录。图6(a)报告了取得的结果。关于过滤后的目录，其结果处于乐观的区域，与随机猜测有"显著"的偏差，与随机猜测相比，显示出高达4.75的概率增益（对于M6.5级地震）。相反，合成测试的结果总是拒绝 $\alpha=5\%$ 的无效假设。

最后，通过进行Molchan分析，假设随机预报，也评估了地震群对所取得结果的可能影响（如Michael[1997]中讨论的）。为了达到这个目的，我们保留了SSTA的空间特征和时间长度，同时随机生成了每个SSTA的起始时间。通过这种方式，我们生成了50个合成SSTA的集合。图6(b)显示了Molchan分析的结果；只报告了在合成洗牌SSTA上取得的结果的平均值。这种分析的平均值（图6(b)）和所有的结果（见辅助资料中的表S4）都落在误差图的不乐观区域；它们都在显著水平 $\alpha=5\%$ 下拒绝了空假设。应该指出的是，偶尔也有G值（高达1.9）的记录，即使它们总是小于在真实数据上取得的相应数值。

4. 迈向多参数方法

所进行的分析表明，所取得的结果并不取决于地震的时空分布。此外，它们表明，在SSTA和M6地震之间存在着非偶然的相关性（与随机猜测函数相比，见Zecher和Jordan, 2008，以及其中的参考文献）。这些情况表明，"基于RST的卫星热异常"可被视为短期内评估地震灾害的多参数系统（t-DASH；Tramutoli等人, 2014）中的参数之一。

多参数方法，即有可能将非地震学参数和地震学参数的"地震预测"能力结合起来，可以被认为是提高我们估计未来地震概率能力的一个有希望的方法。到目前为止，所提出的OEF方法在实际（估计概率的绝对值太低）和一般（预测在很大程度上局限于有前震的地震）操作适用性方面受到很大限制（例如，Panza等, 2014；Wang & Rogers, 2014）。为了最大限度地提高这些方法的整体预测能力，一些作者提出了一些基于预测模型组合的"多参数方法"。例如，Sobolev等人（1991）使用贝叶斯公式计算条件概率，Rhoades和Gerstenberger（2009）建议通过加权平均的方式组合模型，而Rhoades等人（2014）和Shebalin等人（2014）分别提出了组合模型和/或地震前兆的乘法结构。Nakatani（2020）提出了一种不同的方法，即考虑到警报所占据的空间-时间体积，而不是警报/异常的数量。

我们期望通过结合多参数观测，有力地减少警报的时空体积（图7），以及逐步减少错误警报的综合概率。事实上，由于

- $P_{V_i} M$ 在 A_i 和时间间隔 T_i 范围内，即在警戒范围 $V_i = A_i \cdot T_i$ 内，发生震级等于或大于 M 的地震的概率（事先估计并基于有关第1参数的长期相关分析）。
- V 是由 N 个参数同时发出警报的体积，即由每个参数单独发出警报的体积的交集，有

$$V = \bigcap_{i=1}^N A_i \cdot T_i \cap_{i=1}^N V_i \quad (6)$$

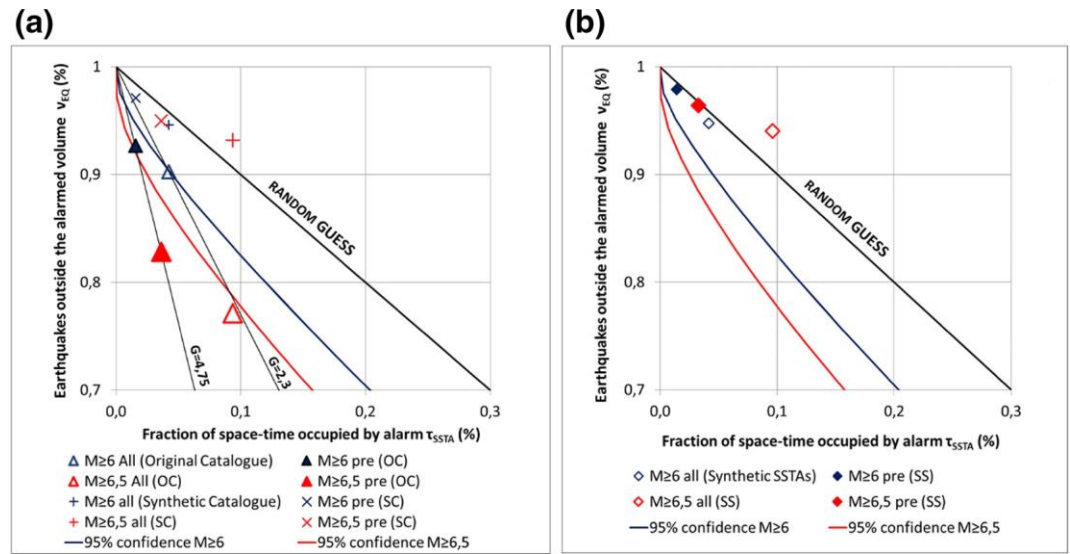


图6

(a)使用按月过滤的地震目录进行分析的相关误差图。与图5(a)一样，使用合成目录进行分析的结果（见辅助资料中的表S3）也是通过其平均值报告的。符号含义与图5(a)相同。(b)

考虑到随机预报(即合成SSTA)而进行的分析的误差图。该分析将属于过滤后的月度目录的事件作为"目标"进行分析。蓝色和红色的菱形表示使用合成SSTA进行分析的结果的平均值。支持信息中的表S4报告了分析的全部细节。SSTAs, 重要的热异常序列。

量级等于或大于 M 的地震发生的联合概率 $P_I(M)$ 。

V 可以按以下表达式计算。

$$P_I(M) = \prod_{i=1}^N P_{V_i}(M) \quad (7)$$

其中我们假设假阳性与独立过程有关。

在选择纳入多参数系统的观测点时，将考虑到各种指征

- 来自于为解释地震过程不同阶段的不同参数（地震学和非地震学）之间的关系而提出的物理模型，以及
- 由长期的相关分析提供，其中 $P_{V_i}(M)$ 值，描述了"地震预测"每个参数的能力，可以得到。

作为一个例子，LAIC模型（Pulinets和Ouzounov, 2011）及其随后的重新解释（例如，Kuo等人, 2014）描述了不同的大气和电离层参数之间的联系，以及它们在地震过程的最后阶段如何相互耦合。例如，在Pulinets和Ouzounov（2011）提出的机制中，断层激活可以带来近地表空气的异常电离（由于密集的氢气排放），这可能引发大气层和电离层不同层次的可测量的异常情况。例如，文献（如Pulinets等人, 2018年）报告了在地震发生前，发射的长波红外辐射、电场、相对湿度、地球化学势等的异常变化在特定时间序列中的预期出现。

然而，为了评估每个候选参数在成功预测、假阳性率和/或错过事件方面的预测潜力，需要进行长期研究。此外，他们应该清楚地表明，在多参数地震预报系统中，要使用的震级约束和相应的警报时空量，以及为每个调查区域计算的相对权重（以地震发生概率计算）。

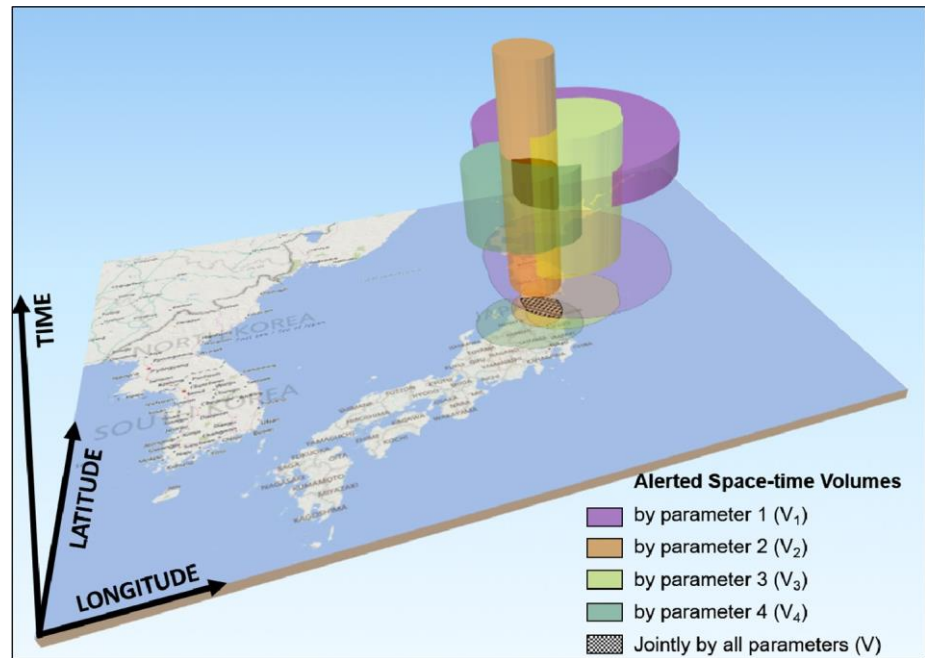


图7.通过多参数方法减少警报时空体积的三维示意图。彩色的圆柱体代表每个（非地震学和地震学）参数的“警报”时空体积 V_i 。这些圆柱体的交点 V 确定了作为多参数观测整合结果的联合“警报”时空体积。

例如，考虑到日本国情，除了这项关于卫星热异常的研究外，还有人进行了长期的相关分析。

- Wang等人（2013）对1999年至2009年关东地区（日本中部）每日GPS测量的地面变形进行了研究，他们显示，对于M5.5级的地震，与泊松模型相比，概率增益为2-4，虚惊率低于50%。
- Hattori等人（2013）和Han等人（2014, 2017）对10年（2001-2010）的地磁数据进行了记录。在关东地区的一些台站中，他们强调超低频地震磁现象发生在距台站100/150公里范围内的中度大地震前数周至数天。特别是，Han等人（2014年）记录了在Kakioka站观察到的数据，与随机猜测相比，概率增益为1.6。
- Hayakawa等人（2010年）对7年（2001-2007年）的VLF/LF数据进行了研究，他们强调，亚电离层的过流发生在深度较浅（<40公里）的M6地震发生前的几天到1周。
- Kon等人（2011年）对GIM-TEC地图的研究表明，在选定的M6地震上，TEC的异常情况出现在1998年5月至2010年5月期间，距震中1000公里范围内的地震发生前5天至1天的梨子。

尽管这些参数中的一些需要更好地加以限定，例如在假阳性率和可实现的概率增益方面，但上述研究可以代表向日本或至少部分地区（例如关东地区）的多参数t-DASH系统迈出的初步一步。

5. 结论

在多参数方法中整合不同的观测数据，可以改善我们目前对地震相关过程的认识，并加速开发一个可操作的t-DASH系统。一个多参数系统的建立初步需要

1. 识别那些在与地震准备过程的可能关系中表现出显著（统计意义上的）变化的参数（基于合适的物理模型和/或实验观测）。
2. 测量具有充分时空连续性的候选参数。
3. 确定有根有据和可重复的数据处理技术，能够从其他变化中分辨出地震特征。
4. 确定这些观测特征与地震发生（时间、位置、震级等）之间的相关程度（基于长期分析）；以及
5. 评估t-DASH多参数系统中所考虑的参数的影响（即，即使与随机猜测相比，实际的信息含量）。

在本文中，我们遵循这五个步骤，以验证“基于RST的TIR异常”是否能成为t-DASH系统的合适候选者。为此，我们使用了JAMI和IMAGER卫星传感器获得的夜间热图像，这些卫星搭载在MTSAT-1R和-

2地球静止平台上，在2005年7月至2015年12月期间，在日本境内进行了基于RST方法的长期分析（11年）。此外，为了减少由独立于地震活动的原因（即假阳性TA）产生的TIR异常的扩散（例如，可变的云层覆盖），我们引入了一个新的方案（即MWC而不是传统的FWC）来计算RST参考场。

长期的RST分析表明，

- SSTA的出现非常零星；所有TIR卫星图像中只有1.8%显示有SSTA的存在。
- 应用新提出的方案来计算RST参考场，实现了假阳性TA的减少（从50%到37.9%）。特别是在选定的地区，假阳性率下降到了零。
- 基于对SSTA的明确定义和明确的验证规则，所进行的相关分析结果显示，62.1%的SSTA在地震（ M_{JMA} ）震中和发生时间的预定时空跨度内。一个明显的趋势是，SSTA出现在地震发生之前（70%的SSTA与地震有关）。
- 误差图的结果显示了一种非正常的相关性。特别是，对于大地震，当使用1天的时间窗口进行解聚时，我们记录的概率增益高达4.3，而不是随机猜测。
- 延长1个月的解聚时间窗口，正如预期的那样，并没有显著改变的结果。误报率从37.9%上升到41.3%，概率从4.3上升到4.75。

鸣谢

本文是N.G.利用JSPS博士后奖学金访问日本期间取得的部分成果，由千叶大学环境遥感中心（日本）通过联合研究计划和日本文化科学省（MEXT）在其地震和火山爆发预测的观测和研究计划下共同资助。N.G.特别感谢JSPS和千叶大学理学院提供这样的机会。一个机会。导致这些结果的研究也是EC-FP7 PRE-EARTH-QUAKES（为地球地震前兆研究处理俄罗斯和欧洲的地球观测）项目活动的一部分，G.A.n. 263502。作者感谢环境遥感中心提供MTSATs热红外数据的宝贵支持，并感谢日本气象厅提供地震数据。

数据可用性声明

关于MTSATs的热红外数据可在<ftp://mtsat.cr.chiba-u.ac.jp/>，地震数据可在http://www.jma.go.jp/en/quake/quake_singen_index.html。

参考文献

- Akhoondzadeh, M. (2013). A comparison of classical and intelligent methods to detect potential thermal anomalies before the 11 August 2012 Varzeghan, Iran, earthquake ($M_w = 6.4$). *Natural Hazards and Earth System Science*, 13(4), 1077-1083. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1077-2013>
- Aki, K. (1989). Ideal probabilistic earthquake prediction. *Tectonophysics*, 169(1-3), 197-198. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90193-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90193-5)
- Aliano, C., Corrado, R., Filizzola, C., Genzano, N., Pergola, N., & Tramutoli, V. (2008a). 用于监测地震活跃地区的鲁棒性TIR卫星技术。限度、主要成就和前景。 <https://doi.org/10.4401/ag-3050>
- Corrado, R., Filizzola, C., Pergola, N., & Tramutoli, V. (2008b). 卫星技术（RST）在热监测方面的应用
- 地震多发区。1997年10月翁布里亚-马尔凯地震事件的案例。 *Annales Geophysicae*, 51(2/3), 451-459. Barka, A. (1999). 1999年8月17日伊兹密特地震。 *科学*, 285, 1858-1859.
- Bellaoui, M., Hassini, A., & Bouchouicha, K. (2017). 遥感地表温度测量中的震前异常。 The case study of 2003 Boumerdes earthquake. *Advances in Space Research*, 59(10), 2645-2657. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.03.004>
- Bonfanti, P., Genzano, N., Heinicke, J., Italiano, F., Martinelli, G., Pergola, N., et al. (2012). 在拉奎拉地震序列（2009年3月至4月）期间，亚平宁中部（意大利）的CO₂-气体排放变化证据。 *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 53(1), 147-168.
- Chiodini, G., Caliro, S., Cardellini, C., Frondini, F., Inguaggiato, S., & Matteucci, F. (2011). 阿布鲁佐2009年地震中心区富含二氧化碳气体来源的地球化学证据和特征。 *Earth and Planetary Science Letters*, 304(3-4), 389-398. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.02.016>

- Cicerone, R. D., Ebel, J. E., & Britton, J. (2009). A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 476, 371-396. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.008>
- Cuomo, V., Filizzola, C., Pergola, N., Pietrapertosa, C., & Tramutoli, V. (2004). 一个自给自足的GERB阴天辐射度检测方法-
tion. *大气研究*, 72, 39-56.
- Dobrovolsky, I. P., Zubkov, S. I., & Miachkin, V. I. (1979). 估算地震准备区的大小. *Pure and Applied Geo-physics PAGEOPH*, 117, 1025-1044. <https://doi.org/10.1007/BF00876083>
- Dogliani, C., Barba, S., Carminati, E., & Riguzzi, F. (2014). 断层通断与地震流体反应. *Geoscience Frontiers*, 5, 767-780. Eleftheriou, A., Filizzola, C., Genzano, N., Lacava, T., Lisi, M., Paciello, R., et al. (2016). 与2004-2013年期间希腊发生的地震有关的反常TIR序列的长期RST分析. *Pure and Applied Geophysics*, 173(1), 285-303. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1116-8>
- Eneva, M. D., Adams, N., Wechsler, Y., Ben-Zion, Y., & Dor, O. (2008). 来自遥感数据的南加州断层的热属性 (由NASA根据SAIC合同赞助的报告, 编号为NNH05CC13C, 第70页). Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center.
- Filizzola, C., Pergola, N., Pietrapertosa, C., & Tramutoli, V. (2004). 地震活跃地区监测的鲁棒性卫星技术. 对1999年9月7日雅典地震的敏感性分析. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29(4-9), 517-527. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.11.019>
- Freund, F. T. (2007). Pre-earthquake signals-Part I: Deviatoric stresses turn rocks into a source of electric currents. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 535-541.
- Fu, C. C., Lee, L. C., Ouzounov, D., & Jan, J. C. (2020). 2009-2019年期间, 台湾地区发生M6.0地震前的地球出射长波辐射变化. *Frontiers in Earth Science*, 8, 364.1-15. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00364>
- Geller, R. J. (1997). 地震预测. A critical review. *国际地球物理学报*, 131, 425-450.
- Genzano, N., Aliano, C., Corrado, R., Filizzola, C., Lisi, M., Mazzeo, G., et al. (2009). 2009年4月6日阿布鲁佐地震发生时MSG-SEVIRI TIR辐射的RST分析. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 2073-2084. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-2073-2009>
- Genzano, N., Filizzola, C., Lisi, M., Pergola, N., & Tramutoli, V. (2020). 争取开发一个多参数系统, 对意大利的地震灾害进行短期评估. *Annales Geophysicae*, 63(5), PA550. <https://doi.org/10.4401/ag-8227>
- Genzano, N., Filizzola, C., Paciello, R., Pergola, N., & Tramutoli, V. (2015). 通过卫星TIR观测监测地震易发区的稳健卫星技术 (RST). 1999年池州地震 (台湾) 案例. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114, 289-298. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.02.010>
- Halle, W., Oertel, D., Schlottzauer, G., & Zhukov, B. (2008). Erdbenenfrüherkennung mit InfraRot Sensoren aus dem Weltraum (pp. 1-106). Berlin-Adlershof: DLR. <https://elib.dlr.de/58678/>
- Han, P., Hattori, K., Hirokawa, M., Zhuang, J., Chen, C. H., Febriani, F., et al. (2014). 2001-2010年期间日本垣冈超低频地震-磁铁现象的统计分析. *地球物理研究杂志. Space Physics*, 119, 4998-5011. <https://doi.org/10.1002/2014JA019789>
- Han, P., Hattori, K., Zhuang, J., Chen, C. H., Liu, J.-Y., & Yoshida, S. (2017). 使用Molchan的误差图评估日本垣冈的超低频地震磁现象. *Geophysical Journal International*, 208, 482-490. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw404>
- Han, P., Zhuang, J., Hattori, K., Chen, C. H., Febriani, F., Chen, H., et al. (2020). 评估2000-2010年期间日本关东地区记录的超低频磁场数据中潜在的地震前兆信息. Distance and magnitude dependences. *Entropy*, 22, 859. <https://doi.org/10.3390/e22080859>
- Hattori, K., Han, P., Yoshino, C., Febriani, F., Yamaguchi, H., & Chen, C. H. (2013). 2000-2010年期间日本关东地区超低频地震磁现象的调查. 案例研究和统计研究. *Surveys in Geophysics*, 34, 293-316. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9215-x>
- Hayakawa, M., Kasahara, Y., Nakamura, T., Muto, F., Horie, T., Maekawa, S., et al. (2010). 亚电离层VLF/LF传播所看到的低电离层扰动与地震之间的相关性的统计研究. *地球物理研究杂志*, 115, A09305. <https://doi.org/10.1029/2009JA015143>
- Heinicke, J., Martinelli, G., & Telesca, L. (2011). 圣福斯蒂诺 (中央亚平宁山脉, 意大利) 的二氧化碳气体排放的地球动力学诱发的变化. *Geofluids*, 12, 123-132.
- Irwin, W. P., & Barnes, I. (1980). 二氧化碳排放和地震的构造关系. *地球物理研究杂志*, 85, 3115-3121.
- 日本气象厅. (2021). JMA (日本气象厅) 地震目录. http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index_e.html
- Jiao, J. X., Zhao, Z. H., & Shan (2018). 来自光学卫星观测的震前异常现象. A review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 1013-1036. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1013-2018>
- Ke, F., Wang, Y., Wang, X., Qian, H., & Shi, C. (2016). 通过GPS TEC对中国Ms > 5.0地震相关的地震电离层异常进行统计分析. *Journal of Seismology*, 20(1), 137-149.
- Khalili, M., Panah, S. K. A., & Eskandar, S. S. A. (2019). 使用鲁棒卫星技术 (RST) 来确定强震前的热异常. A case study of the Saravan earthquake (April 16th, 2013, MW = 7.8, Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 173, 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.01.009>
- Kon, S., Nishihashi, M., & Hattori, K. (2011). 1998-2010年期间日本地区可能与M6.0地震有关的电离层异常. 案例研究和统计研究. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.10.005>
- Kossobokov, V., & Shebalin, P. (2003). 地震预测. In V. I. Keilis-Borok & A. A. Soloviev (Eds.), *Nonlinear dynamics of the Lith-Borokosphere and earthquake prediction* (pp. 141-205). Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.
- Kossobokov, V. G. (2006). 测试地震预测方法. "西太平洋地震的短期预测, 震级 MwHRV 5.8". *Tectonophysics*, 413, 25-31.
- Kuo, C. L., Lee, L. C., & Huba, J. D. (2014). 岩石圈-大气圈-电离层系统的改进耦合模型. *Geophysical Research 杂志. Space Physics*, 119, 3189-3205. <https://doi.org/10.1002/2013JA019392>
- Le, H., Liu, J. Y., & Liu, L. (2011). 2002-2010年间736次M6.0+地震前电离层异常的统计分析. *杂志 of Geophysical Research*, 116, A02303. <https://doi.org/10.1029/2010JA015781>
- Li, J., Wu, L., Dong, Y., Liu, S., & Yang, X. (2007). An quantitative model for tectonic activity analysis and earthquake magnitude prediction based on thermal infrared anomaly. In *International geoscience and remote sensing symposium (IGARSS)* (pp. 3039-3042). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2007.4423485>

- Li, M., & Parrot, M. (2013). 电离层参数的统计分析作为地震预测的基础。《地球物理学报》研究。 *Space Physics*, 118, 3731-3739. <https://doi.org/10.1002/jgra.50313>
- Lisi, M., Filizzola, C., Genzano, N., Grimaldi, C. S. L., Lacava, T., Marchese, F., et al. (2010). 通过将RST方法应用于15年的AVHRR TIR观测, 对2009年4月6日的阿布鲁佐地震进行研究。 *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 395-406. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-395-2010>
- Liu, J. Y., Chen, C. H., Chen, V. I., Yang, W. H., Oyama, K. I., & Kuo, K. W. (2010). 2001-2007年台湾利用GPS TEC的赤道电离异常监测的电离层地震前兆的统计研究。 *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(1), 76-80.
- Liu, J. Y., Chen, Y. I., Chu, Y. J., & Chen, C. S. (2006). A statistical investigation of pre-earthquake ionospheric anomaly. *Journal of Geo-physical Research*, 111, A05304. <https://doi.org/10.1029/2005JA011333>
- Liu, J. Y., Chen, Y. I., Huang, C. H., Ho, Y. Y., & Chen, C. H. (2015). 台湾1993-2004年期间雷电活动与M5.0地震的统计研究. *Surveys in Geophysics*, 36(6), 851-859.
- Lucente, F. P., Gori, P. D., Margheriti, L., Piccinini, D., Bona, M. D., Chiarabba, C., & Agostinetti, N. P. (2010). 2009年意大利MW6.3拉奎拉地震前, 地震速度和各向异性的时间变化。 *Geology*, 38, 1015-1018.
- Martinelli, G., Facca, G., Genzano, N., Gherardi, F., Lisi, M., Pierotti, L., & Tramutoli, V. (2020). 意大利中部的地震相关信号通过水文地质化学和卫星技术检测。 *Frontiers of Earth Science*, 8, 584716. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.584716>
- Michael, A. J. (1997). 测试预测方法。地震聚类与泊松模型的对比。 *Geophysical Research Letters*, 24, 1891-1894.
- Molchan, G. (2012). On the testing of seismicity models. *Acta Geophysica*, 60(3), 624-637. <https://doi.org/10.2478/s11600-011-0042-0>
- Molchan, G. M. (1990). 强震预测的策略。 *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 61, 84-98.
- Molchan, G. M. (1991). 地震预测中最优策略的结构。 *Tectonophysics*, 193(4), 267-276. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90336-Q](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90336-Q)
- Molchan, G. M. (1997). 地震预测是一个决策问题。 *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*, 149(1), 233-247. <https://doi.org/10.1007/BF00945169>
- Molchan, G. M., & Kagan, Y. Y. (1992). 地震预测和它的优化。 *地球物理研究杂志*, 97, 4823. <https://doi.org/10.1029/91JB03095>
- Mukhopadhyay, U. K., Sharma, R. N. K., Anwar, S., & Dutta, A. D. (2021). 遥感视角下的地震和热异常。 In A. E. Hassanien & A. Darwish (Eds.), *机器学习与大数据分析范式: 分析、应用和挑战*. 大数据研究 (第77卷). Cham, Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59338-4_11
- Nakatani, M. (2020). 评价地震前的现象和地震可预测性. *Journal of Disaster Research*, 15(2), 112-143.
- Panza, G., Kossobokov, V. G., Peresan, A., & Nekrasova, A. (2014). 为什么估计地震灾害和风险的标准概率方法经常出错, 地震灾害、风险和灾难。 *Earthquake Hazard, Risk and Disasters* (pp. 309-357). 阿姆斯特丹, 荷兰: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394848-9.00012-2>
- Pergola, N., Aliano, C., Coviello, I., Filizzola, C., Genzano, N., Lacava, T., et al. (2010). 使用RST方法和EOS-MODIS辐射来监测地震活跃地区。对2009年4月6日阿布鲁佐地震的研究。 *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 239-249. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-239-2010>
- Piscini, A., De Santis, A., Marchetti, D., & Cianchini, G. (2017). 用多参数气候学方法研究2016年Amatrice-Norcia (意大利中部) 地震的准备阶段。 *Pure and Applied Geophysics*, 174(10), 3673-3688. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1597-8>
- Pulinets, S. A., & Ouzounov, D. (2011). Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model-An unified concept for earthquake precursors validation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41, 371-382.
- Pulinets, S. A., Ouzounov, D., Karelin, A. V., & Davidenko, D. V. (2018). 岩石圈-大气圈-电离层-磁层耦合-地震前信号生成的概念。 In D. Ouzounov, S. Pulnits, K. Hattori, & P. Taylor (Eds.), *Pre-earthquake processes: 地震预测研究的多学科方法*. *Geophysical monograph series* (pp. 79-98). AGU Publication; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.; Washington, D. C: Geophysical Union.
- Qiang, Z., Xu, X., & Dian, C. (1997). 案例27 即将发生的地震的热红外异常前兆。 *Pure and Applied Geophysics*, 149, 159-171. <https://doi.org/10.1007/BF00945166>
- Rhoades, D. A., & Gerstenberger, M. C. (2009). Mixture models for improved short-term earthquake forecasting. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99, 636-646. <https://doi.org/10.1785/0120080063>
- Rhoades, D. A., Gerstenberger, M. C., Christophersen, A., Zechar, J. D., Schorlemmer, D., Werner, M. J., & Jordan, T. H. (2014). Regional earthquake likelihood models II: Information gains of multiplicative hybrids. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(6), 3072-3083. <https://doi.org/10.1785/0120140035>
- Scholz, C. H., Sykes, L. R., & Aggarwal, Y. P. (1973). 地震预测。一个物理基础。 *Science*, 181, 803-810.
- Schorlemmer, D., Werner, M. J., Marzocchi, W., Jordan, T. H., Ogata, Y., Jackson, D. D., et al. (2018). 研究地球-地震可预测性的合作组织。成就和优先事项。 *Seismological Research Letters*, 89(4), 1305-1313. <https://doi.org/10.1785/0220180053>
- Shah, M., & Jin, S. (2015). 全球Mw 5.0地震前的地震电离层GPS TEC干扰的统计特征 (1998-2014). *地球动力学杂志*, 92, 42-49.
- Shebalin, P., Keilis-Borok, V., Gabrielov, A., Zaliapin, I., & Turcotte, D. (2006). 通过对岩石圈动力学的反向分析进行短期地震预测。 *Tectonophysics*, 413, 63-75. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.10.033>
- Shebalin, P. N. (2018). 将概率地震模型与前兆信息相结合。 In D. Ouzounov, S. Pulnits, K. Hattori, & P. Taylor (Eds.), *Pre-earthquake processes: 地震预测研究的多学科方法*. *地球物理学专著系列* (pp. 173-195). AGU Publication; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.; Washington, D. C: Geophysical Union.
- Shebalin, P. N., Narteau, C., Zechar, J., & Holschneider, M. (2014). 使用差分概率收益结合地震预测。 *地球、行星和空间*, 66, 37. <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-37>
- Sobolev, G. A., Chelidze, T. L., Zavyalov, A. D., Slavina, L. B., & Nikoladze, V. E. (1991). 基于参数组合的预期地震地图。 *Tectonophysics*, 193, 255-265. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90335-P](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90335-P)
- Tamburello, G., Pondrelli, S., Chiodini, G., & Rouwet, D. (2018). 延伸构造对二氧化碳地球脱气的全球尺度控制。 *自然通讯*, 9, 4608.
- Thomas, J. N., Huard, J., & Masci, F. (2017). 2000-2014年期间M6.0地震发生前全球电离层地图总电子含量变化的统计研究。 *地球物理学研究杂志*. *Space Physics*, 122, 2151-2161. <https://doi.org/10.1002/2016JA023652>

- Tramutoli, V. (1998). Robust AVHRR Techniques (RAT) for environmental monitoring: 理论和应用。In G. Cecchi & E. Zil- ioli (Eds.), *Proceedings of SPIE* (Vol. 3496, pp. 101-113). 地球表面遥感II. 发表于SPIE论文集。 <https://doi.org/10.1117/12.332714>
- Tramutoli, V. (2007). 用于自然和环境灾害监测和缓解的稳健卫星技术 (RST)。理论和应用。In *2007 international workshop on the analysis of multi-temporal remote sensing images* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MULTITEMP.2007.4293057>
- Tramutoli, V., Aliano, C., Corrado, R., Filizzola, C., Genzano, N., Lisi, M., et al. (2009). 温室气体排放率的突然变化作为在地震活跃地区从卫星上观察到的TIR异常的一个可能的遗传模型。In *Proceedings, 33rd International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE33)* (pp. 567-570). ISRSE 2009. Stresa ; 意大利; 2009年5月4日至2009年5月8日
- Tramutoli, V., Aliano, C., Corrado, R., Filizzola, C., Genzano, N., Lisi, M., et al. (2013). 关于使用强大的卫星技术 (RST) 观察到的地震易发区热红外辐射 (TIR) 异常的可能来源。 *Chemical Geology*, 339, 157-168. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.10.042>
- Tramutoli, V., Corrado, R., Filizzola, C., Genzano, N., Lisi, M., Paciello, R., & Pergola, N. (2015). 在两个意大利地震区基于RST的卫星治疗监测一年。 *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 56(June), 275-294. <https://doi.org/10.4430/bgta0150>
- Tramutoli, V., Corrado, R., Filizzola, C., Genzano, N., Lisi, M., & Pergola, N. (2015). 从视觉比较到强大的卫星技术: 30年的热红外卫星数据分析用于研究地震准备阶段。 *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 56(June), 167-202. <https://doi.org/10.4430/bgta0149>
- Tramutoli, V., Cuomo, V., Filizzola, C., Pergola, N., & Pietrapertosa, C. (2005). Assessing the potential of thermal infrared satellite surveys for monitoring seismically active areas: Kocaeli (İzmit) 地震的 1999年8月17日。 *Remote Sensing of Environment*, 96(3-4), 409-426. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.04.006>
- Tramutoli, V., Filizzola, C., Genzano, N., & Lisi, M. (2018). 用于检测震前热异常的鲁棒性卫星技术。In D. Ouzounov, S. Pulnits, K. Hattori, & P. Taylor (Eds.), *Pre-earthquake processes: 实验结果表明, 地震前的过程是一个多学科的地震预测研究方法*. *Geophysical monograph series* (pp. 234-258). AGU Publication; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.; Washington, D. C: Geo- physical Union.
- Tramutoli, V., Jakowski, N., Pulnits, S., Romanov, A., Filizzola, C., Shagimuratov, I., et al. (2014). 从PRE-EARTHQUAKES到EQUOS: 如何在一个新的系统内利用多参数观测, 以在操作前的民用保护背景下对地震灾害进行时间依赖性评估 (T-DASH)。在第二届欧洲地震工程 和地震学会议 (2ECEES) 上发表的论文, 土耳其, 2014年8月24-29日。
- Tramutoli, V., & Vallianatos, F. (2020). 前言: 多参数、随时间变化的地震灾害评估和地球- 地震预测的进展。 *Annals of Geophysics*, 63(5), 1-5. <https://doi.org/10.4401/ag-8594>
- Tronin, A. A. (1996). 卫星热调查-研究地震活动区域的新工具。 *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1439-1455.
- Tronin, A. A. (2006). 遥感和地震。A review. *地球的物理和化学*, 31, 138-142. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.024>
- Wang, K., & Rogers, G. C. (2014). 地震防备不应该在每天或每周的基础上波动。 *Seismological Research Letters*, 85(3), 569-571. <https://doi.org/10.1785/0220130195>
- Wang, T., Zhuang, J., Kato, T., & Bebbington, M. (2013). Assessing the potential improvement in short-term earthquake forecasts from incorporation of GPS data. *Geophysical Research Letters*, 40, 2631-2635. <https://doi.org/10.1002/grl.50554>
- Xiong, P., Gu, X. F., Bi, Y. X., Shen, X. H., Meng, Q. Y., Zhao, L. M., et al. (2013). 探测双角形沿轨扫描辐射计数据中的地震红外异常。 *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(8), 2065-2074. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2065-2013>
- Zechar, J. D., & Jordan, T. H. (2008). 测试基于警报的地震预测。 *Geophysical Journal International*, 172(2), 715-724. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03676.x>
- Zechar, J. D., & Jordan, T. H. (2010). The area skill score statistic for evaluating earthquake predictability experiments. *Pure and Applied Geophysics*, 167(2010), 893-906. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0086-0>
- Zhang, Y., & Meng, Q. (2019). 利用MODIS LST数据对RST提取的TIR异常与四川地区地震的关系进行统计分析. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19, 535-549. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-535-2019>
- Zhu, F., Su, F., & Lin, J. (2018). 2003-2014年期间M6.0+地震前TEC异常的统计分析. *Pure and Applied Geophysics*, 175(2018), 3441-3450. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1869-y>
- Zhu, F., Zhou, Y., Lin, J., & Su, F. (2014). 2003-2012年M7.0+地震前电离层TEC异常的时间分布统计研究。 *Astrophysics and Space Science*, 350(2), 449-457.