



## 1979年帝王谷地震速度脉冲型地震动的识别和初步讨论

韩璐 陶正如 曹泽林 陶夏新

Preliminary discussion and identification of pulse-like strong motion for the 1979 Imperial Valley earthquake

Han Lu, Tao Zhengru, Cao Zelin, Tao Xiaxin

引用本文:

韩璐, 陶正如, 曹泽林, 陶夏新. 2022. 1979年帝王谷地震速度脉冲型地震动的识别和初步讨论. 地震学报[J], 44(1): 158–169. DOI: 10.11939/jass.20210089

HanL, TaoZ R, CaoZ L, TaoX X. 2022. Preliminary discussion and identification of pulse-like strong motion for the 1979 Imperial Valley earthquake. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(1): 158–169. DOI: 10.11939/jass.20210089

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20210089>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 近断层地震动最强速度脉冲方向分量特性研究

Characteristics of near-fault velocity pulses in the strongest pulse orientation  
地震学报. 2018, 40(5): 673–688 <https://doi.org/10.11939/jass.20170151>

#### 适用于全周期结构的速度脉冲型地震动强度表征参数研究

Intensity measures of pulse-like ground motions in the full periods  
地震学报. 2019, 41(4): 536–547 <https://doi.org/10.11939/jass.20190002>

#### 近断层速度脉冲型地震动特征周期的估计与调整

Estimation and adjustment of eigenperiod of response spectrum of near-fault pulse-type ground motion  
地震学报. 2020, 42(4): 471–481 <https://doi.org/10.11939/jass.20190155>

#### 台湾双冬断层近场脉冲型地震动的数值模拟

Numerical simulation of near-field pulse-like ground motion for the Shuantung fault in Taiwan region  
地震学报. 2019, 41(3): 377–390 <https://doi.org/10.11939/jass.20180103>

#### 基于 $L_1$ 范数正则化的强震动加速度记录基线漂移识别方法

A method for identifying the baseline drift of strong-motion records based on  $L_1$ -norm regularization  
地震学报. 2019, 41(1): 111–123 <https://doi.org/10.11939/jass.20180072>

#### 岩土介质随机性对沉积河谷地震动放大效应的影响

Effect of randomness of geotechnical medium on the seismic ground motion amplification effect of a sedimentary valley  
地震学报. 2017, 39(5): 764–777 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.05.011>

韩璐, 陶正如, 曹泽林, 陶夏新. 2022. 1979 年帝王谷地震速度脉冲型地震动的识别和初步讨论. 地震学报, 44(1): 158–169. doi: [10.11939/jass.20210089](https://doi.org/10.11939/jass.20210089).

Han L, Tao Z R, Cao Z L, Tao X X. 2022. Preliminary discussion and identification of pulse-like strong motion for the 1979 Imperial Valley earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 44(1): 158–169. doi: [10.11939/jass.20210089](https://doi.org/10.11939/jass.20210089).

# 1979 年帝王谷地震速度脉冲型地震动的识别和初步讨论<sup>\*</sup>

韩 璐<sup>1)</sup> 陶正如<sup>1), †</sup> 曹泽林<sup>2)</sup> 陶夏新<sup>1,3)</sup>

1) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室

2) 中国河北邯郸 056038 河北工程大学土木工程学院

3) 中国哈尔滨 150090 哈尔滨工业大学土木工程学院

**摘要** 以 1979 年  $M_W 6.5$  帝王谷地震为例, 比较了小波变换法、峰点法(PPM)和零点法(ZVPM)识别近断层速度脉冲型强震记录的能力, 三种方法识别出的脉冲峰值基本一致, 脉冲周期略有差别。为分析速度脉冲的产生机制, 包括产生时间、位置以及凹凸体的影响, 借助频率-波数域格林函数法(FK 法)合成近断层宽频带地震动, 采用峰点法逐步识别各子源地震动叠加过程中产生的速度脉冲。通过时频方法分析叠加过程中子源地震动频率成分的变化, 分析凹凸体和台站的空间关系对脉冲产生的影响, 初步探讨近断层速度脉冲的产生机制。

**关键词** 速度脉冲 脉冲识别 FK 法 凹凸体 脉冲参数

doi: [10.11939/jass.20210089](https://doi.org/10.11939/jass.20210089) 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

## Preliminary discussion and identification of pulse-like strong motion for the 1979 Imperial Valley earthquake

Han Lu<sup>1)</sup> Tao Zhengru<sup>1), †</sup> Cao Zelin<sup>2)</sup> Tao Xiaxin<sup>1,3)</sup>

1) Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

2) School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China

3) School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

**Abstract:** Taking the 1979  $M_W 6.5$  Imperial Valley earthquake as an example, we compared the three methods of pulse-like strong motion identification, that is, wavelet analysis, peak-point method (PPM) and zero velocity point method (ZVPM). The identified peak values are similar, however, the identified pulse periods are slightly different. To analyze the mechanism of the velocity pulse, including the generation time, location, and the impact of asperity, we use the frequency-wavenumber Green's function (FK method) to synthesize broadband ground motion.

\* 基金项目 国家重点研发计划(2019YFE0115700)和国家自然科学基金(51678540, 51778197 和 51478443)共同资助。

收稿日期 2021-05-30 收到初稿, 2021-08-27 决定采用修改稿。

作者简介 韩璐, 博士研究生, 主要从事工程地震研究, e-mail: [13045107179@163.com](mailto:13045107179@163.com);

<sup>†</sup>陶正如, 博士, 研究员, 主要从事工程地震、地震灾害风险管理研究,  
e-mail: [taozr@foxmail.com](mailto:taozr@foxmail.com)



PPM is used to gradually identify the velocity pulses during the superposition of the sub-source ground motions. Analyzing the changes of the frequency components in sub-fault ground motion during the superposition process by using time-frequency analysis method and the impact of the spatial relationship between the asperity and the station on the pulse generation, preliminarily discuss the generation mechanism of the velocity pulse.

**Key words:** velocity pulse; pulse identification; FK method; asperity; pulse indicator

## 引言

Benioff (1955) 在 1952 年  $M_w 7.5$  科恩县地震的远场记录中发现破裂传播方向会引起地震动辐射能量随方位角变化的现象。在 1957 年怀尼米港的  $M_4.7$  地震中, Housner 和 Hudson (1958) 从距震中西北约 8 km 的美国海岸及地质调查局(United States Coast and Geodetic Survey) 的一个强震仪的记录中观察到了第一个单脉冲强地震动, 提醒工程师注意这类来自小震级地震的强烈地震作用所造成的工程结构的严重破坏。Housner 和 Trifunac (1967) 在 1966 年帕克菲尔德  $M_6.0$  地震的 2 号台站加速度记录中, 首次认识并解释了近断层方向性效应引起的速度大脉冲(Aki, 1967, 1968), 记录的速度脉冲幅值达到 73 cm/s。在随后发生的 1994 年美国北岭市地震、1999 年台湾集集地震和 2011 年日本 3·11 地震的近断层强震记录中多次观察到速度脉冲。方向性效应引起的速度脉冲型地震动以短持时、高能量为特征, 工程结构, 尤其是长周期结构, 在其作用下会产生较大的位移和变形, 故而引起了工程界的广泛关注。Anderson 和 Bertero (1987) 的研究表明, 如果脉冲周期与结构的自振周期相近, 结构损伤更严重。脉冲型地震动的频谱形状与非脉冲型地震动相比有很大差别, 对结构抗震设计有更严格的要求(Iervolino, Cornell, 2008)。

一般来说, 当观测台站位于破裂方向且破裂速度接近传播介质的剪切波速时, 破裂方向性效应会引起速度大脉冲。对于走滑断层, 滑冲效应引起的单侧速度大脉冲主要出现在断层平行向, 常伴随着地表永久位移; 破裂方向性效应引起的双侧速度大脉冲主要出现在断层垂直向, 一般在强地震动的初始阶段出现, 不一定造成永久位移。Somerville 等(1997) 和 Somerville (2003) 的研究表明, 长周期脉冲型地震动不仅会造成地表永久位移, 还会造成场地地震动幅值、持时等的空间差异。在高频部分, 方向性效应令破裂方向上断层远端的加速度记录强震段持时较短且幅值较大, 破裂起始点加速度记录的幅值较低、持时较长; 低频部分, 破裂方向性引起长周期地震波相长干涉和大幅值相干速度脉冲。刘启方(2005) 在均匀弹性全空间以及基岩半空间内讨论了方向性产生的速度脉冲和震源参数之间的关系, 表明断层的埋深、震级大小、初始破裂点和凹凸体的位置都会对脉冲的周期和幅值产生影响。Fayjaloun 等(2017) 的研究表明, 断层的几何形状和破裂速度是影响脉冲持续时间的主要因素。Poiata 等(2018) 分析倾滑断层中脉冲型地震动的产生机制, 发现下盘台站中, 方向性效应对脉冲的产生起主导作用, 而在上盘台站中, 由 Kagawa (2009) 所提出的聚集效应是脉冲产生的原因。Scala 等(2018) 通过模拟 2009 年意大利拉奎拉地震的地震动, 发现脉冲的出现和持续时间不完全取决于震源上升时间, 与平均上升时间、台站位置、破裂速度和断层埋深关系较大, 破裂面粗糙度对其影响较小。罗全波(2019) 模拟了 1999 年台湾集集地震中的速度脉冲型地震动, 发现震源模型中凹凸体埋深和上升时间对速度脉冲的波形、周期和幅值均有贡献。具体表现是, 速度脉冲周期与凹凸体的上升时间成正比, 速度脉冲的幅值与凹凸体上

升时间呈反比。曹泽林(2020)借助频率-波数域格林函数(FK 法)合成了 1979 年帝王谷  $M_{\text{W}}6.5$  地震和 1994 年北岭市  $M_{\text{W}}6.7$  地震的地震动场, 基于等时线理论解释了速度脉冲的形成机理, 认为震源参数、地壳结构的剪切波速、不连续界面的位置、界面两侧速度差都会影响脉冲区域, 错动量分布对脉冲区域有显著影响。

本文以 1979 年帝王谷地震为例, 分别用三种方法识别近断层强震观测记录的速度脉冲。随后, 借助基于 FK 法合成的地震动, 通过观察子源地震动叠加过程中的频率成分变化, 速度脉冲出现的时间和凹凸体与台站的空间关系, 初步探讨近断层脉冲型地震动的产生机制。

## 1 强震记录的速度脉冲识别

### 1.1 研究数据

1979 年帝王谷  $M_{\text{W}}6.5$  地震发生在美国与墨西哥交界的圣安德烈斯断裂带附近, 震中为 ( $32.64^{\circ}\text{N}$ ,  $115.30^{\circ}\text{W}$ ) 位于地震多发和重点观测地区, 震源深度为 8 km。这是一次走滑地震, 破裂始于帝王断层并触发了布劳利断层。前者走向为  $323^{\circ}$ 、倾角为  $80^{\circ}$ , 在帝王谷断层产生了长达 30.5 km 的地表破裂; 后者走向为  $360^{\circ}$ 、倾角为  $90^{\circ}$ , 产生总长 13 km 不连续的地表破裂(Archuleta, 1984)。在近断层加速度时程中发现 PGA 的空间分布与破裂方向相关, 呈现明显的方向性特征。本文从美国太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, 缩写为 PEER)收集断层距 20 km 内 31 个台站东西向和南北向两个水平分量的加速度记录, 震中、断层地表投影和台站位置示于图 1a, 加速度时程见图 1b。

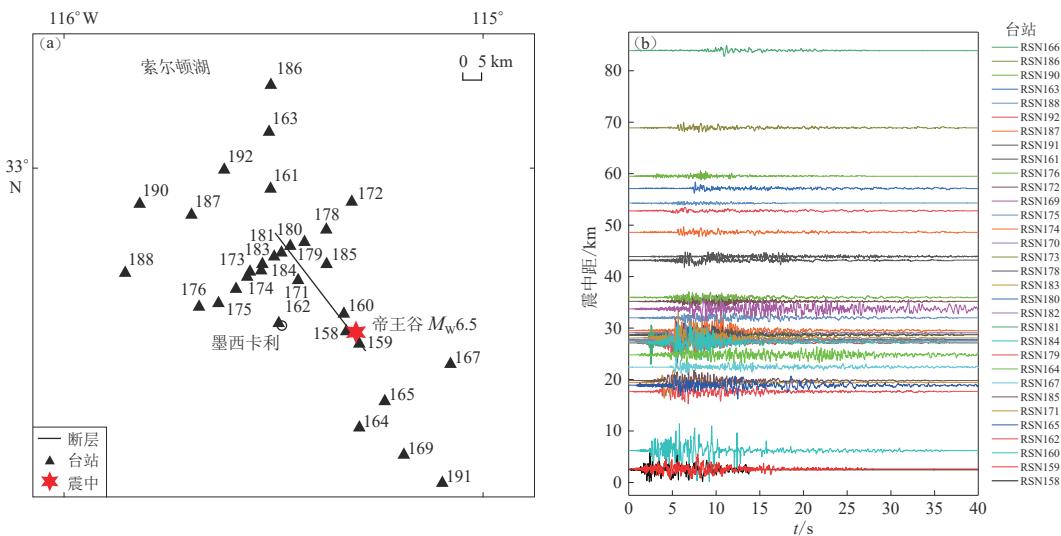


图 1 帝王谷地震震中、断层投影和台站位置 (a) 及 31 个台站的加速度时程 (b)

Fig. 1 The location of epicenter, fault projection and stations (a) and acceleration records at 31 stations (b) of the Imperial Valley earthquake

### 1.2 速度脉冲识别方法及在帝王谷地震中的应用

近十余年出现了一些脉冲特征识别的方法, 大体上可以分为两类: 一类从地震学的角度出发, 关注在地震记录早期出现的速度脉冲, 认为其单纯由断层破裂引起; 另一类面向工程抗震设计, 不论脉冲是如何及何时产生, 在整个地震动时程中识别脉冲, 考虑其对工程结构

的影响。第一类方法以 Baker (2007) 及 Shahi 和 Baker (2014) 提出的小波变换识别方向性效应产生的脉冲为代表。选取 4 阶 Daubechies 小波作为母波，对速度时程进行连续小波变换，绝对值最大的小波系数用来确定脉冲的周期和位置，第一次实现了通过脉冲指标量化识别速度脉冲型地震动。对美国西部地区下一代衰减关系(Next Generation Attenuation-West2，缩写为 NGA-West2)的 398 条脉冲型地震动进行分类和统计，Baker (2007) 给出了脉冲型地震动识别指标的表达式为

$$PI = \frac{1}{1 + e^{-23.3 + 14.6(\text{PGV ratio}) + 20.5(\text{energy ratio})}}, \quad (1)$$

式中，PGV ratio 表示提取脉冲后残余地震动的 PGV 与原始地震动记录 PGV 之比；energy ratio 表示提取脉冲后残余地震动与原始地震动记录能量之比。图 2 是借助该方法识别出脉冲型地震动的一个例子，识别标准为：① 脉冲指标  $PI \geq 0.85$ ；② 前方向性效应引起的脉冲型地震动中，为排除晚到或非方向性效应产生的脉冲，要求速度时程记录前 20% 能量所在时刻迟于脉冲记录前 10% 能量所在时刻；③ 原始地震动的  $\text{PGV} > 30 \text{ cm/s}$ 。

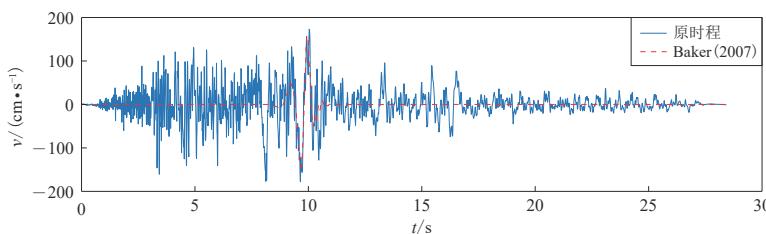


图 2 小波变换法识别出的速度脉冲型地震动

Fig. 2 Identification of pulse-like ground motion by wavelet transform

小波变换方法可以识别出单脉冲型地震动，但反复进行小波变换令计算效率不高 (Mukhopadhyay, Gupta, 2013)，脉冲指标  $PI \geq 0.85$  这一标准可能会遗漏部分  $PI$  值处于 0.15—0.85 之间含有脉冲的速度记录 (Mena, Mai, 2011)。为克服这些局限性，Zhai 等 (2013) 认为在短时间内能量骤增的脉冲型地震动对工程结构的危害更严重，从工程学角度提出了基于能量的识别和提取方法。该方法采用 Dickinson 和 Gavin (2011) 的脉冲模型，所用脉冲拟合函数能有效识别不同峰值、形状和宽度的脉冲，其表达式为

$$V_p(t; V_p, T_p, N_c, T_{pk}, \varphi) = V_p \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}\left(\frac{t-T_{pk}}{N_c T_p}\right)^2\right] \cos\left(2\pi \frac{t-T_{pk}}{T_p} - \varphi\right), \quad (2)$$

式中， $V_p$  为拟合脉冲峰值， $T_p$  为拟合脉冲周期， $N_c$  为拟合脉冲个数， $T_{pk}$  为脉冲峰值时刻， $\varphi$  为脉冲相位角。

Zhai 等 (2013) 认为保留 Dickinson 和 Gavin (2011) 模型中模拟脉冲的几个关键参数，如脉冲周期和脉冲峰值等，可让模型计算能力得到大幅度提升，故将模型进行了简化：由于只考虑单脉冲型地震动，令表示半循环脉冲个数的  $N_c=1$ ，半循环脉冲的相位为 0。简化这两个参数后，利用式(2)与速度时程信号进行最小二乘拟合得到最匹配的脉冲峰值  $V_p$  和对应的周期  $T_p$ 。脉冲周期的研究初期，Osaki (1994) 考虑到地震动速度时程曲线很不规则，无法准确地定义脉冲的起点和终点，故而提出了峰点法(peak point method，缩写为 PPM)。脉冲周期的值定义为与 PGV 相邻的波峰或者波谷的时间间隔。Zhai 等 (2013) 根据 PGV 确定脉冲幅值  $V_p$ ，以

脉冲相对能量为判别指标, 范围在 0—1 之间, 超过阈值即为脉冲型地震动。为了避免将幅值较低或距离断层较远的地震动判别为脉冲型, 与 Baker (2007) 相同, 用 PGV 大于 30 cm/s 作为标准, 从 NGA 数据库 3 635 条记录中筛选出 357 条脉冲型地震动记录。计算脉冲相对能量  $E_p$ , 将  $E_p$  阈值设定为 0.3, 即  $E_p \geq 0.3$  的地震动被判定为脉冲型。图 3 为该方法识别的一例脉冲型地震动。

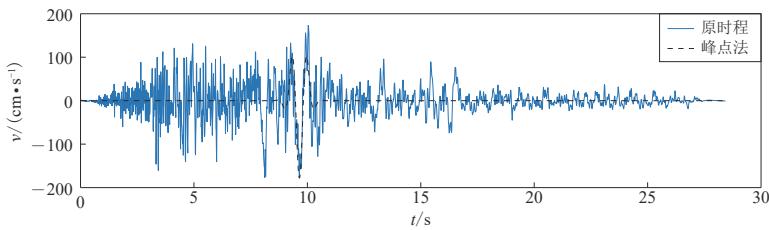


图 3 峰点法识别脉冲型地震动

Fig. 3 Identification of pulse-like ground motion by PPM

小波分析和能量法是识别单脉冲型地震动的两种方法。但方向性效应引起的脉冲一般包含主、次脉冲, 主、次脉冲的周期一般相差较小。一个有效的脉冲识别方法应该能够识别出多脉冲型地震动, Zhao 等(2016)所选用的零点法(zero velocity point method, 缩写为 ZVPM)提取速度脉冲的核心思想是通过定义速度时程中循环振动的区间长度作为脉冲周期, 针对不同脉冲型记录定义不同的判别标准。通过识别地震动速度时程中不同循环振动区间的地震动参数获得等效速度脉冲。若识别的脉冲型地震动只有一个速度脉冲, 则脉冲的能量比阈值为 0.3; 对包含多个脉冲的地震动, 分别确定能量比为 0.6, 0.8 和 0.9 作为双脉冲、三脉冲和四脉冲型地震动的阈值。综上, Baker (2007) 及 Shahi 和 Baker (2014) 提出的小波变换法通过小波变换提取速度脉冲, 第一次以客观指标识别脉冲型地震动; Zhai 等(2013)提出的峰点法以 Dickinson 和 Gavin (2011) 模型为基础建立能量指标, 在脉冲周期的识别上有明显进步; Zhao 等(2016)用零点法确定脉冲周期的判别方法, 给出识别多脉冲型地震动的阈值。图 4 为采用三种方法识别脉冲型地震动的一个例子。

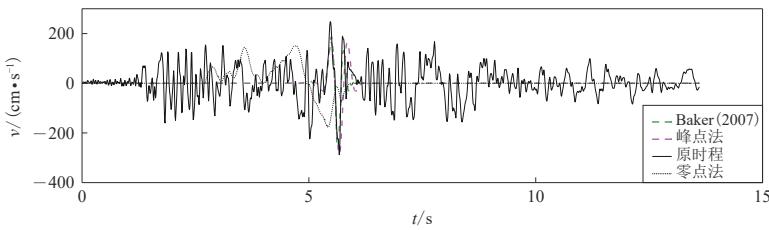


图 4 三种方法提取 RSN158 台站记录的脉冲

Fig. 4 Identification of pulse-like ground motion by three methods

以帝王谷地震为例, 比较用这三种方法识别脉冲参数的差别。首先, 将 31 个台站东西向和南北向两个水平分量的强震记录通过式(3)旋转为垂直断层方向 FN 和平行断层方向 FP (Somerville *et al.*, 1997), 即

$$\begin{cases} V_{FN} = V_{EW}\sin\phi + V_{NS}\cos\phi, \\ V_{FP} = V_{EW}\cos\phi - V_{NS}\sin\phi. \end{cases} \quad (3)$$

小波变换法、峰点法、零点法三种方法分别识别出12条、12条、13条脉冲型地震动。三种方法共同识别出在FN方向上含有脉冲的台站所提取出的脉冲周期 $T_p$ 和脉冲峰值 $V_p$ 列于表1。

表1 三种方法识别出的帝王谷地震中脉冲型地震动的脉冲参数

Table 1 The pulse indicators of pulse-like ground motions in the Imperial Valley earthquake identified by three methods

RSN台站编号	脉冲周期 $T_p$ /s			脉冲峰值 $V_p$ /(cm·s <sup>-1</sup> )		
	小波变换法	峰点法	零点法	小波变换法	峰点法	零点法
158	—	1.9	1.9	—	59	60
159	2.3	1.9	1.9	53	50	53
161	4.3	4.2	3.3	51	55	52
170	4.4	3.9	3.5	79	63	71
171	3.4	3.2	3.1	121	111	115
173	4.5	3.3	4.9	69	71	70
178	4.5	4.4	4.4	69	61	60
179	4.8	4.4	3.8	81	89	82
180	4.1	3.9	2.1	130	133	136
181	3.8	3.5	4.8	155	156	160
182	4.4	3.1	4.4	98	100	109
185	2.8	3.5	3.0	68	71	72

三种方法识别出的脉冲峰值基本一致，大多数差别小于5%；脉冲周期因数学模型及算法的不同有一定差别，大多数差别大于10%，零点法的结果一般小于其它两种方法的结果。图5给出了三种方法识别出的含有脉冲的台站与断层地表投影的空间关系。

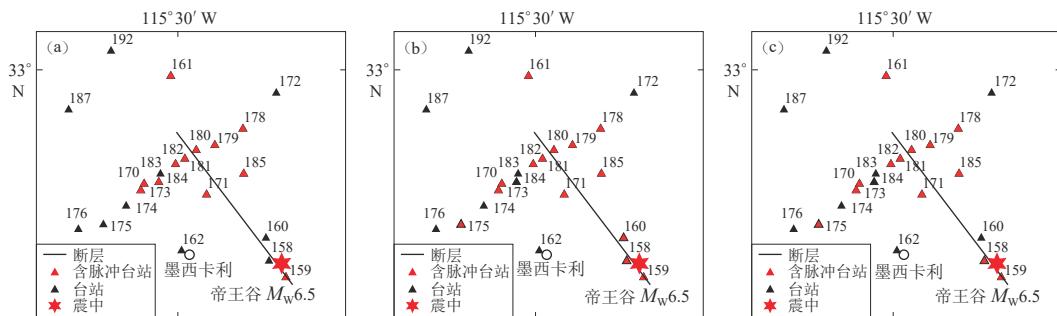


图5 小波变换(a)、峰点法(b)和零点法(c)识别出的速度脉冲的台站

Fig. 5 Stations with velocity pulse identified by wavelet transform (a), PPM (b), and ZVPM (c)

可见，三种方法识别出的脉冲记录台站主要分布在垂直于断层的方向上；小波变换法主要识别出的是近断层区域的速度脉冲，RSN160台站位于震中附近；峰点法和零点法可以识别出距断层较远的RSN175台站的脉冲型地震动。这是由前述两种方法的出发点不同所引起的。

## 2 合成地震动的速度脉冲识别

### 2.1 基于 FK 法合成的宽频带地震动

本文采用的基于 FK 法的宽频带地震动场合成方法(曹泽林, 2020)是在频率波数域求解格林函数结合有限断层震源模型的方法。该方法合成地震动的带宽主要取决于震源模型, 高频分量主要由震源时间函数和上升时间控制, 低频分量主要由错动分布控制, 破裂速度的不均匀性和平均值也有影响。在有限断层震源模型中, 断层多取为规则形状的破裂面, 将其划分为  $N_L \times N_W$  个沿走向和倾向相同大小的子源。从破裂起始点后破裂的能量以一定的速度传播, 每个子源引起的地表场地上的地震动根据子源与场地的几何关系和区域地壳速度结构计算, 各子源引起的地震动按一定的时滞进行叠加(式(4)), 最后得到场地的地震动。

$$a(t) = \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} a_{ij} [(t - (\Delta t'_{ij} + \Delta t''_{ij}))], \quad (4)$$

式中,  $t$  为破裂时间,  $\Delta t'_{ij}$  为第  $i$  个子源的破裂时间,  $\Delta t''_{ij}$  为第  $ij$  个子源到地表点的传播时间。

本文以帝王谷地震为例, 借助该方法合成的地震动, 从时间和空间上分析震源破裂过程对脉冲型地震动的贡献。震源参数参考了 Hartzell 和 Heaton (1983) 的成果, 详细信息列于表 2。

表 2 帝王谷地震的震源参数  
Table 2 Source parameters of Imperial Valley earthquake

震源机制	走向/°	倾角/°	断层参数				子源个数			凹凸体			
			埋深/km	长度/km	宽度/km	面积/km <sup>2</sup>	沿走向	沿倾向	个数	面积/km <sup>2</sup>	长度/km	宽度/km	中心沿走向、倾向位置/km
走滑型	323	90	8	42	10.4	436.8	16	8	1	102	13	7.8	22, 6.4

断层面上的错动量和滑动角分布来自有限断层破裂模型数据库 SRCMO (图 6)。破裂面上仅有一个凹凸体, 位于断层中部, 破裂起始点如图中矩形所示, 沿破裂面向右上方逐渐破裂, 耗时 13 s 左右。

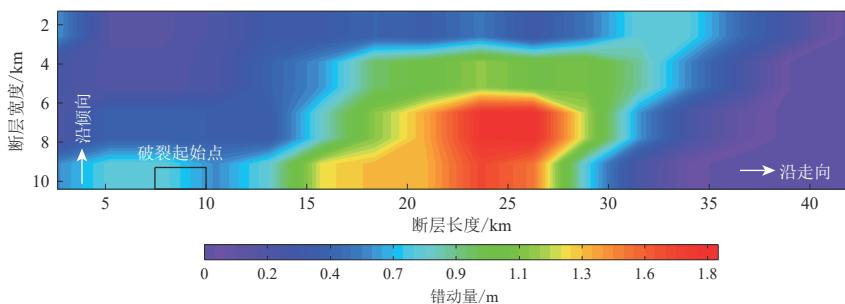


图 6 帝王谷地震断层面上的错动分布  
Fig. 6 Slip distribution on the fault plane of the Imperial Valley earthquake

### 2.2 借助子源叠加过程分析脉冲机制

现有的研究多关注于凹凸体的个数和位置、破裂速度、破裂方式以及上升时间对脉冲型地震动的影响(Somerville *et al.*, 1997; Somerville, 2003)。曹泽林(2020)的研究表明, 除了震源参数和地壳结构等影响因素外, 其它因素也可能引起脉冲型地震动, 例如, 某些场地位于破

裂面的凹凸体附近，或地震波穿过复杂地壳结构。Lin (2020)通过对台湾花莲地震中脉冲型地震动的前向建模的结果表明，速度脉冲的特征受米伦断层中的一个子断层影响。为探究凹凸体和台站空间位置等与脉冲产生机制的关系，本文以曹泽林(2020)基于FK方法合成的31个帝王谷台站的地震动为基础，在含有脉冲且位于破裂前方的10个台站中识别各个子源地震动叠加生成各个地表台站地震动时程过程中的速度脉冲，分析子源地震动叠加过程对形成速度脉冲的影响。由于篇幅所限，本文给出台站RSN158(图7a)，RSN179的例子(图7b)，台站RSN158位于震中附近，凹凸体破裂的前方，台站RSN179位于凹凸体破裂后方且垂直于断层的方向。图中，阴影部分表示在叠加过程中识别出脉冲对应的子源，虚线圈出的长方形为凹凸体位置。在台站RSN158地震动的叠加过程中，在破裂起始点附近的子源就产生脉冲直至破裂完成均识别出脉冲；对于RSN179台站的地震动，叠加过程中第一次出现脉冲的子源位于凹凸体内部，随后破裂的所有子源叠加的地震动中均识别出脉冲。

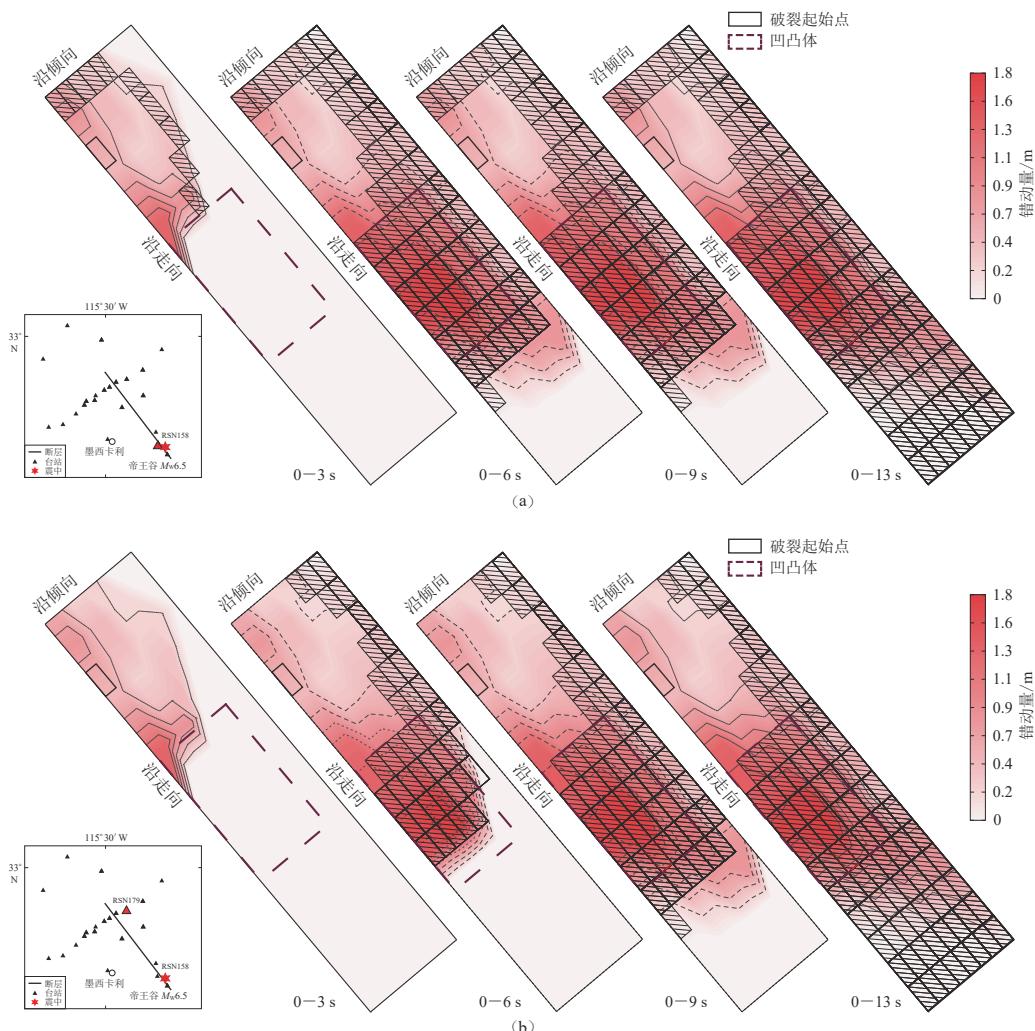


图 7 台站 RSN158 (a) 和台站 RSN179 (b) 在破裂过程中出现脉冲的子源

Fig. 7 The velocity pulse appears during rupture process at station RSN158 (a) and station RSN179 (b)

由图 7 可知, 脉冲产生的早晚以及首次出现脉冲的子源位置和台站与凹凸体的空间关系有关。对所有台站均识别各个子源地震动叠加生成地震动时程过程中的速度脉冲, 共有 10 个台站的实际地震记录和合成记录中都识别出了脉冲。从脉冲初次出现对应的子源、凹凸体和台站的空间位置关系, 分析凹凸体对形成速度脉冲的影响(图 8)。图中, 红色矩形为首先出现脉冲对应的子源, 虚线圈出的长方形为凹凸体位置。

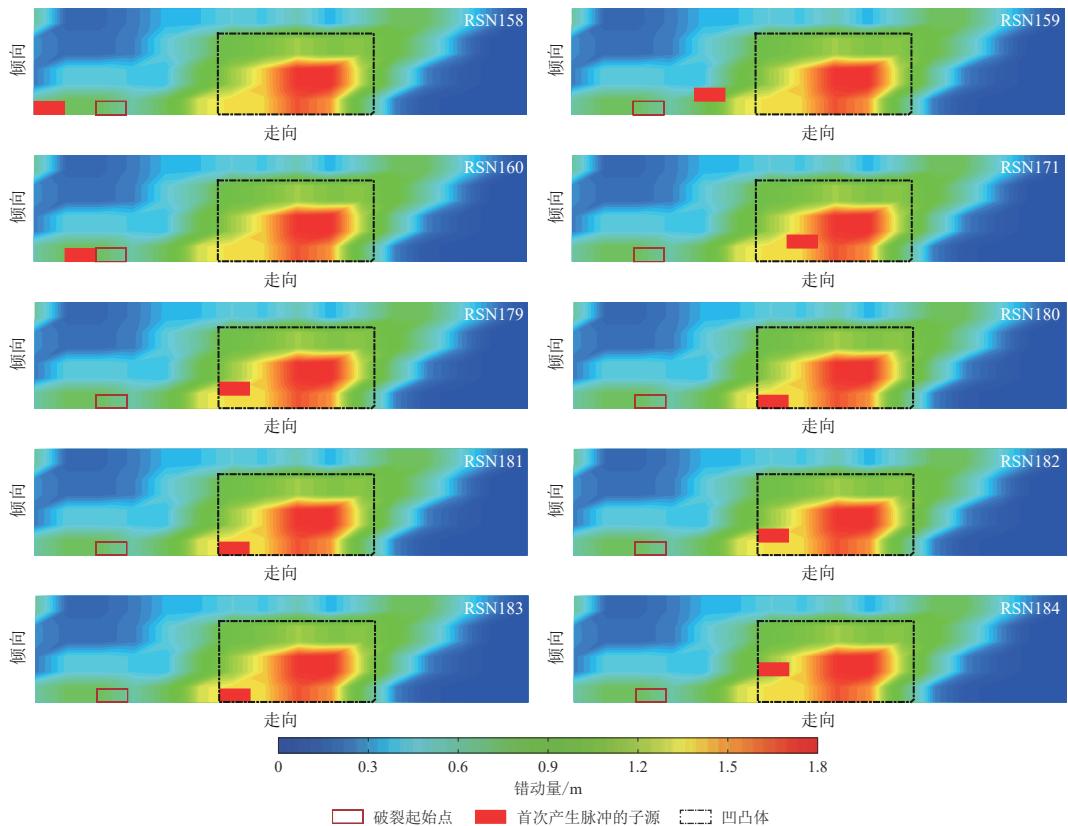


图 8 最初产生脉冲的子源位置与凹凸体和错动量的关系

Fig. 8 The relationship between the sub-source position that the pulsefirst generated, the asperity and the slip distribution

可见, 在震中附近台站(RSN158, RSN159 和 RSN160), 脉冲初次出现时对应的子源位置在破裂起始点周围。随着子源时程的不断叠加, 当叠加到凹凸体内子源时, 沿破裂方向、距震中较远台站(RSN171, RSN179, RSN180, RSN181, RSN182, RSN183, RSN184)的合成地震动中识别出脉冲, 直至破裂完成, 这些台站的合成地震动中始终能识别出脉冲。而脉冲的产生在子源地震动不断叠加的过程中得以体现, 根据蒋连接和白国良(2016)的研究, 脉冲型地震的能量主要集中在低频部分。通过小波变换, 给出台站 RSN158 和 RSN179 在叠加过程中不同子源地震动的时频分析图(图 9)。

从台站 RSN158 的地震动叠加过程可见, 自破裂起始点开始, 较高频率能量的释放转为低频能量集中, 持续时间较短, 通常单脉冲的脉冲周期大于 0.5 s, 在叠加到最初产生脉冲的子源位置时, 低频能量的持时变长, 低频脉冲能量明显, 判定为速度脉冲。而 RSN179 台站,

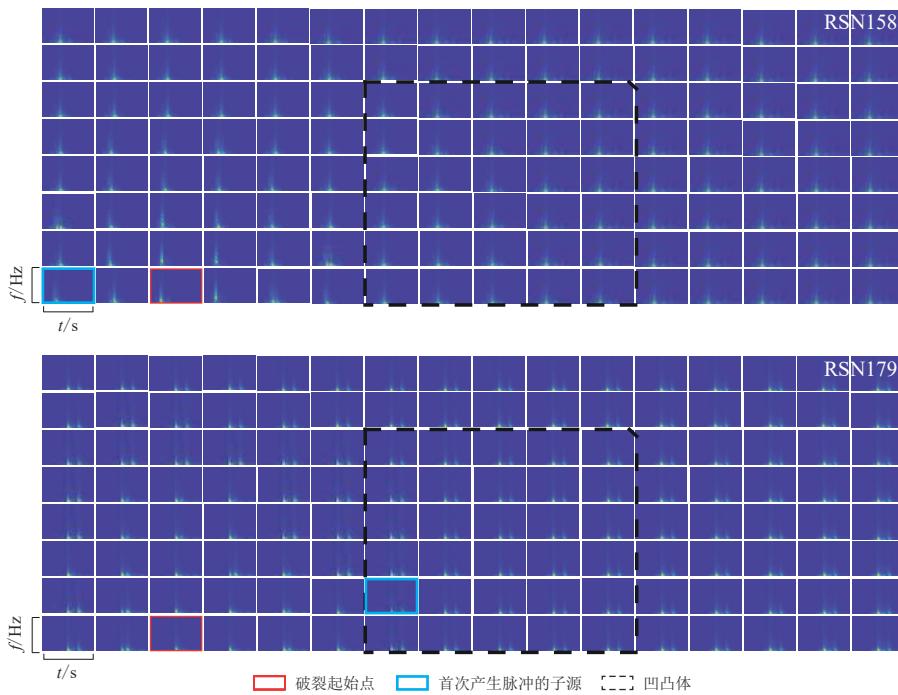


图 9 叠加过程中的时频分析

Fig. 9 Time-frequency analysis in superposition process

在叠加到凹凸体内部的子源时，伴随着长持时和显著的低频脉冲能量，速度脉冲初次产生。从位于凹凸体破裂前后方台站地震动的叠加过程来看，首次出现脉冲的子源以及相应的低频分量含量表明凹凸体与台站的空间关系对脉冲的产生有很大影响，这与上述曹泽林(2020)和 Lin (2020)的结论一致。

### 3 讨论与结论

本文以帝王谷地震为例，分别用三种方法识别脉冲型强震记录，借助 FK 法合成的地震动，通过逐步判别各子源地震动叠加过程中合成地震动的速度脉冲，探讨近断层速度脉冲的产生机制，得到以下几点初步结论：

1) 借助小波分析法、峰点法和零点法分别从 31 条近断层强震记录识别速度脉冲，三种方法提取的脉冲峰值差别较小，脉冲周期差别较大，零点法提取的脉冲周期整体上小于其它两种方法的结果。

2) 基于 FK 法的地震动合成方法能有效地表达速度脉冲且可以合成多脉冲地震动，而且合成结果包含震源、地壳速度结构的复杂影响，为进一步分析速度脉冲的产生机制奠定坚实基础。

3) 借助 FK 法合成的子源地震动记录进行叠加，结合凹凸体与台站的空间位置发现，位于凹凸体后方且垂直于断层的台站多数含有速度脉冲；在子源的叠加过程中，当脉冲初次出现对应的子源位于破裂起始点附近，在震中附近台站形成脉冲；位于凹凸体内部，在沿破裂方向上形成速度脉冲；凹凸体的位置对速度脉冲的形成有很大影响。

本文所用强震数据来自美国太平洋地震工程研究中心(The Pacific Earthquake Engineering Research Center)，小波变换程序来自 Baker (2007)，西南交通大学讲师常志旺和哈尔滨工业大学讲师赵国臣提供了峰点法和零点法的计算程序，作者在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- 曹泽林. 2020. 基于 FK 法的三分量宽频带强地震动场合成[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学: 141–142.
- Cao Z L. 2020. *Synthesis of Three-Component Broadband Strong Ground Motion Field Based on FK Approach*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology: 141–142 (in Chinese).
- 刘启方. 2005. 基于运动学和动力学震源模型的近断层地震动研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 19–98.
- Liu Q F. 2005. *Studies on Near-Fault Ground Motions Based on Kinematic and Dynamic Source Models*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 19–98 (in Chinese).
- 罗全波. 2019. 基于运动学震源模型的近断层速度大脉冲数值模拟研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 47–49.
- Luo Q B. 2019. *Studies on Numerical Simulation of Near-Fault Large Velocity Pulse Based on Kinematic Source Model*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 47–49 (in Chinese).
- 蒋连接, 白国良. 2016. 不同类型的近断层脉冲型地震动能量特性研究[J]. 结构工程师, **32**(6): 92–96.
- Jiang L J, Bai G L. 2016. Study on energy characteristics of different types of near fault pulse ground motions[J]. *Structural Engineers*, **32**(6): 92–96.
- Aki K. 1967. Scaling law of seismic spectrum[J]. *J Geophys Res*, **72**(4): 1217–1231.
- Aki K. 1968. Seismic displacements near a fault[J]. *J Geophys Res*, **73**(16): 5359–5376.
- Anderson J C, Bertero V V. 1987. Uncertainties in establishing design earthquakes[J]. *J Struct Eng*, **113**(8): 1709–1724.
- Archuleta R J. 1984. A faulting model for the 1979 Imperial Valley earthquake[J]. *J Geophys Res*, **89**(B6): 4559–4585.
- Baker J W. 2007. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **97**(5): 1486–1501.
- Benioff H. 1955. Mechanism and strain characteristics of the White Wolf fault as indicated by the aftershock sequence; earthquakes in Kern County, California during 1955[J]. *Calif Div Mines Bull*, **171**: 199–202.
- Dickinson B W, Gavin H P. 2011. Parametric statistical generalization of uniform-hazard earthquake ground motions[J]. *J Struct Eng* **137**(3): 410–422.
- Fayjaloun R, Causse M, Voisin C, Cornou C, Cotton F. 2017. Spatial variability of the directivity pulse periods observed during an earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **107**(1): 308–318.
- Hartzell S H, Heaton T H. 1983. Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **73**(6A): 1553–1583.
- Housner G W, Hudson D E. 1958. The port Hueneme earthquake of March 18, 1957[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **48**(2): 163–168.
- Housner G W, Trifunac M D. 1967. Analysis of accelerograms: Parkfield earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **57**(6): 1193–1220.
- Iervolino I, Cornell C A. 2008. Probability of occurrence of velocity pulses in near-source ground motions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **98**(5): 2262–2277.
- Kagawa T. 2009. Conditions of fault rupture and site location that generate damaging pulse waves[C]//*Proceedings of the 6th International Conference on Urban Earthquake Engineering*. Japan: CUUE2009: 53–58.
- Lin Y Y, Kanamori H, Zhan Z W, Ma K F, Yeh T Y. 2020. Modelling of pulse-like velocity ground motion during the 2018  $M_{W}6.3$  Hualien earthquake, Taiwan[J]. *Geophys J Int*, **223**(1): 348–365.
- Mena B, Mai P M. 2011. Selection and quantification of near-fault velocity pulses owing to source directivity[J]. *Georisk*, **5**(1): 25–43.
- Mukhopadhyay S, Gupta V K. 2013. Directivity pulses in near-fault ground motions-I: Identification, extraction and modeling[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **50**: 1–15.

- Osaki Y. 1994. *A Primer on the Spectral Analysis of Ground Motions*[M]. Tokoy: Kajirna Institute Publishing Co: 14–15 (in Japanese).
- Poiaia N, Miyake H, Koketsu K. 2018. Mechanisms for generation of near-fault ground motion pulses for dip-slip faulting[M]//Dalguer L, Fukushima Y, Irikura K, Wu C, eds. *Best Practices in Physics-based Fault Rupture Models for Seismic Hazard Assessment of Nuclear Installations*. Cham: Birkhäuser: 197–212.
- Scala A, Festa G, Del Gaudio S. 2018. Relation between near-fault ground motion impulsive signals and source parameters[J]. *Geophys Res: Solid Earth*, **123**(9): 7707–7721.
- Shahi S K, Baker J W. 2014. An efficient algorithm to identify strong-velocity pulses in multicomponent ground motions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **104**(5): 2456–2466.
- Somerville P G, Smith N F, Graves R W, Abrahamson N A. 1997. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity[J]. *Seism Res Lett*, **68**(1): 199–222.
- Somerville P G. 2003. Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **137**(1/4): 201–212.
- Zhai C H, Chang Z W, Li S, Chen Z Q, Xie L L. 2013. Quantitative identification of near-fault pulse-like ground motions based on energy[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **103**(5): 2591–2603.
- Zhao G C, Xu L J, Xie L L. 2016. A simple and quantitative algorithm for identifying pulse-like ground motions based on zero velocity point method[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **106**(3): 1011–1023.