

利用 NDVI 时间序列识别汶川地震滑坡的分布

杨文涛^{①,②}, 汪明^{①,②,③}, 史培军^①

(^① 民政部—教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875;

^② 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

^③ 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要:利用 MODIS NDVI 产品, 生成了全年 16 天间隔的 NDVI 时间序列, 再经过 Savitzky-Golay 滤波后消除了云的影响, 可以用来识别滑坡。假设 2007 年、2008 年研究区土地利用状况基本不变, 对比 2007 年和 2008 年两年的 NDVI 序列, 并结合汶川地震的发生时间, 可以识别出研究区发生滑坡的区域分布。结合平武县 30m ETM 目视解译滑坡结果, 对自动识别方法进行了验证。结果表明: MODIS 识别出的滑坡与目视解译结果匹配较好。在此基础上, 将本文方法应用到受汶川地震影响最严重的 13 个县区级行政区, 并综合研究区坡度信息, 识别出了汶川重灾区滑坡分布概图。

关键词:汶川地震; NDVI 时间序列; Savitzky-Golay 滤波; 滑坡识别; 滑坡分布

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2012.06.008

中图分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1000-3177(2012)124-0045-04

Identification of Landslides in Wenchuan Earthquake Affected Region Using NDVI Time Series

YANG Wen-tao^{①,②}, WANG Ming^{①,②,③}, SHI Pei-jun^{①,②,③}

(^① Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing 100875; ^② State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875; ^③ Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: In 2008, the Wenchuan earthquake caused massive landslides in mountainous regions. Earthquake induced landslides can distribute widely and can have special spatial distribution patterns. The main limits of using high resolution satellite images to identify landslides are easy affection by clouds, high costs and longer return period. To overcome these faults, it is necessary to explore an effective method to identify landslides by using the free cost and high temporal resolution MODIS data. By using MODIS NDVI products of 16 day interval, yearly NDVI time series can be formed to identify landslides after Savitzky-Golay filtering. The spatial distribution of landslides induced by this event can be further identified by comparing NDVI series between 2007 and 2008 as well as by considering the occurring time of the great earthquake. In this research, Pingwu county is selected as an experimental area to test the efficiency of the proposed method, and landslides interpreted from ETM images with 30m resolution are used to test its precision. Based on above analysis and by adding slope information from DEM, this method is

收稿日期: 2012-02-02 修订日期: 2012-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助(41101505); 国际科技合作项目资助(2010DFB20880); 地表过程与资源生态国家重点实验室团队重点项目。

作者简介: 杨文涛(1987~), 男, 山东聊城人, 博士研究生, 主要从事地震滑坡灾害研究。

E-mail: yangwtgeo@gmail.com

通讯作者: 汪明(1978~), 男, 湖北新洲人, 副教授, 主要从事灾害风险评估与管理方面的研究。

E-mail: wangming@bnu.edu.cn

then applied to the whole Wenchuan affected region which has 13 county-level districts to produce landslide distribution maps of this region.

Key words: Wenchuan earthquake; NDVI time series; Savitzky-Golay filtering; landslide identification; spatial distribution of landslides

1 引言

滑坡灾害,通常是由外界因素触发不稳定坡体引起的,地震和强降雨是引发滑坡的两种最常见的触发因子。山地地区尤其容易发生滑坡灾害,而这些地区又多被浓密的植被覆盖。在滑坡识别工作中,遥感技术是最常用的手段。但是,由于这些覆盖有茂密植被的山地地形往往起伏很大、山体阴影以及云的影响非常显著,使得遥感对滑坡的识别不能很好地发挥作用,而后续的触发因子(余震或降水)会继续作用,从而形成多次触发因子下的滑坡分布。建立单次滑坡触发因子下的完整滑坡分布对地质灾害风险评估至关重要。

传统的滑坡解译技术主要利用航空立体像对识别滑坡,但是这种方法对影像的时相要求较高,需要尽快在单次触发滑坡的因素发生之后立即获得影像;与此同时,航空遥感成本很高,对天气条件要求也高,这些都是利用航空遥感监测滑坡分布的障碍^[1]。随着 QuickBird, IKONOS, SPOT 等卫星的出现,高分、超高分辨率遥感卫星影像成为滑坡目视识别的重要信息源^[2~3]。此外,利用滑坡前后高分辨率 DEM 的差别,滑坡空间分布以及滑坡体的体积也可以得到识别^[4]。但是,高分、超高分卫星影像具有时间分辨率低、重访周期长、易受云影响等缺点。

利用卫星影像识别滑坡,主要是对比滑坡前后同一地区的影像,总体上分为两大类方法:基于像元尺度的滑坡体识别方法和基于影像形态、分割、模式识别的方法。一般而言,非基于像元的方法优于基于像元的方法^[5]。随着 LiDAR (Light Detection And Ranging) 技术的引入,单个滑坡体可以得到精确的量测^[6~7]。与此同时,应用 PS (Permanent Scatters) 技术,干涉雷达 (InSAR) 也可以用于监测地表毫米级的微小形变^[8]。

美国 NASA 的 MODIS 传感器安装在 Aqua 和 Terra 卫星平台上,空间分辨率有 250m, 500m, 1km 等几种,粗空间分辨率带来的是重访周期短、低成本等优势。文章采用 MODIS13Q1 数据产品,该数据空间分辨率为 250m,时间分辨率为 16 天。

2008 年 5 月 12 日,四川省汶川县发生里氏 8.0

级大地震,震中位于 $31.0^{\circ}\text{N}, 103.4^{\circ}\text{E}$ ^[9]。这次大地震引发了超过 56000 个滑坡,覆盖了 41750km^2 的面积^[10],这些滑坡多发在 VIII 度以上烈度区^[11];在随后的几个月里又发生了无数次余震,这些余震引发了一系列后续的地震型滑坡。同时,震后 4 个月里灾区不断发生强降雨事件,又进一步引发了地震—降雨型滑坡和降雨型滑坡。滑坡分布面积较广,且当时的天气状况较差,给滑坡的遥感调查、解译带来了一定的难度。文章旨在利用低成本的 MODIS 粗分辨率卫星影像,研究滑坡事件的空间分布。

2 研究区概况与数据

研究区包括四川、甘肃地震重灾区的 13 个市县区,地理坐标位于: $103^{\circ}50'\text{E} \sim 104^{\circ}58'\text{E}, 31^{\circ}59'\text{N} \sim 33^{\circ}02'\text{N}$ 之间,属青藏高原到四川盆地的过渡地带,境内多高山,海拔从 600 多米到 5000 米以上,变化很大。研究区地势西北高东南低,地形崎岖,山区深切沟谷发育,地质构造复杂,地质灾害多样且频发。

本文使用的 MODIS 数据是 2007 年和 2008 年的 MODIS13Q1 数据,该数据是以 16 天为周期,空间分辨率为 250m 的 NDVI L3 产品。验证数据是 30m 分辨率的 Landsat7 ETM 影像两景,覆盖平武县东部地区,影像获取时间是 2008 年 4 月 30 日和 2008 年 5 月 16 日。将 2007 年和 2008 年的各 23 张 NDVI 产品分别生成 23 波段的“多波段”数据,即影像中每个像元有 23 个波段,代表从当年 1 月到 12 月 16 天间隔的 NDVI 时间序列。

植被的生长状况具有年际循环周期的物候特征^[12]:春季不断加速生长,生物量开始增加;夏季加速生长,叶绿素含量、生物量达到峰值;秋季开始逐渐下降;冬季降到最低点。由于 MODIS 的 NDVI 产品容易受到云的影响,并且常常在反映植被状况的时候偏低。云对 NDVI 的影响具有突变性,即云对 NDVI 值有降低的影响。但滑坡对植被扰动造成的 NDVI 的影响则具有迅速下降和缓慢恢复的表现。针对云对 NDVI 的影响,陈晋等人^[13]在 2004 年给出了 Savitzky-Golay 滤波算法,通过该算法,可以有效地去除云对 NDVI 时间序列的影响,使原始 NDVI 像元值更加接近于真实值。Savitzky-Golay

滤波方法的原理是采用最小二乘卷积法平滑 NDVI 时间序列。这种卷积窗口可以看作是一个权重窗口,作用是消除低值(被认为是噪音引起的),保留高值。这种滤波适用于连续或等间隔的信号序列处理。平滑的滤波公式为:

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} C_i Y_{j+i}}{N} \quad (1)$$

其中, Y 是原始的 NDVI 值, Y_j^* 是滤波之后的 NDVI 值, C_i 是窗口中第 i 个 NDVI 值的系数或权重, N 是窗口的大小, j 是 NDVI 时间序列中第 j 个需要处理的 NDVI 值。平滑滤波效果是由窗口的大小和滤波多项式的级数决定的:窗口越小,滤波多项式级数越低,平滑效果越不明显,细节保存越多;反之,细节保存较少。文章选择滤波多项式级数为 6,半窗口大小为 4。

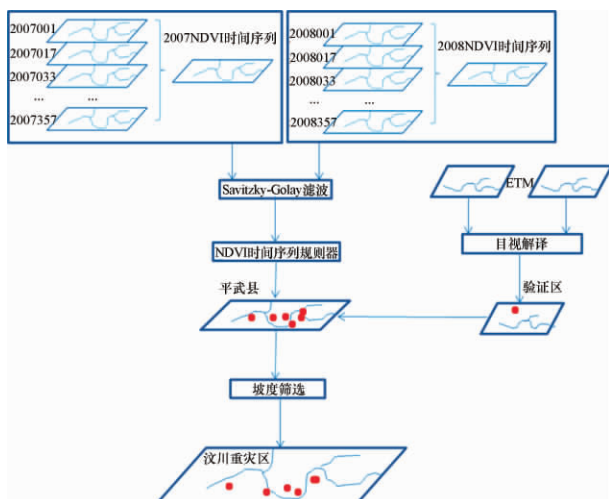


图 1 自动识别流程

3 滑坡识别

该方法建立在两个假设的基础上:研究区主要被植被覆盖;植被的变化由滑坡造成,即选取的研究区大面积被植被覆盖且在 2007 年到 2008 年之间土地利用类型没有发生变化。在逐像元计算时,单像元在 2007 年与 2008 年的时间序列相似;如果时间序列有变化,即在 2008 年 5 月发生明显的下降,在 2008 年后期出现恢复,则判断该时间序列所属像元是汶川地震引发的滑坡,识别该像元为滑坡点位。

结合上述像元时间序列判别标准,首先对平武县境内滑坡自动识别,流程见图 1,共识别出了全县 5.9km² 的滑坡面积,滑坡发生区主要集中在平武县东南沿涪江的谷地及平武县东部汶川断裂带附近,其

他地区滑坡分布较少,如图 2 所示。验证数据为两期 Landsat7 ETM 数据,验证区位于平武县东部滑坡分布较为密集的地方,总面积约 13.8km²(图 3)。

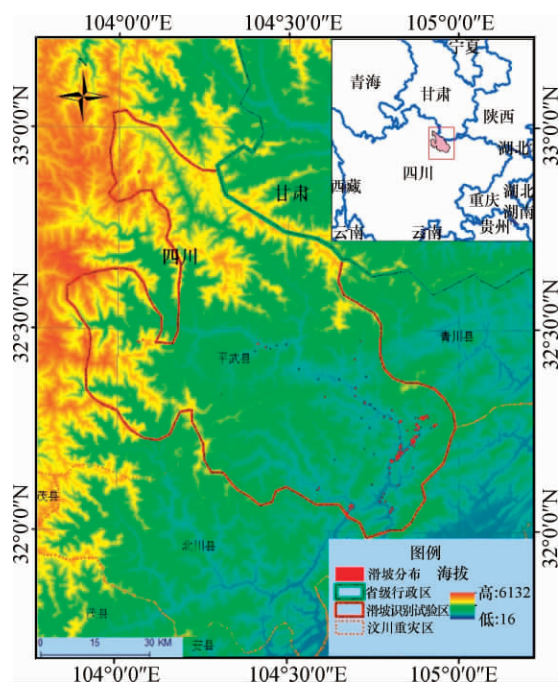


图 2 MODIS 识别的滑坡分布

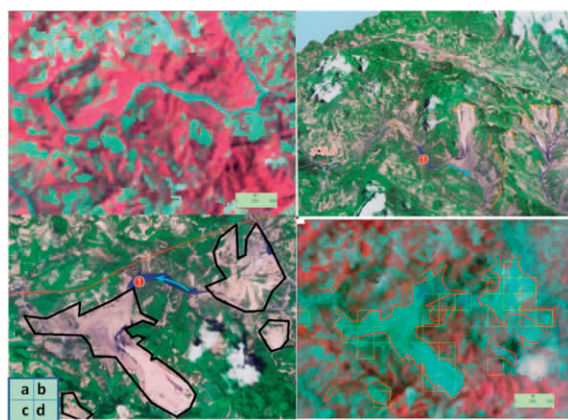


图 3 滑坡识别验证

- (a) 2008 年 4 月 30 日 ETM 影像;
- (b) 文献[14]中研究区地质灾害三维视图;
- (c) 文献[14]中采用的 2008 年 5 月 16 日 2.5m 分辨率 SPOT5 解译的滑坡;
- (d) 目视解译的滑坡体分布与 MODIS 滑坡识别结果的对比

通过对比汶川地震前后验证区的影像,同时参考了《5.12 汶川地震典型地质灾害影像研究》^[14] 中平武县地区地质灾害三维影像图,目视解译出了滑坡区域范围(其中,图 3 最大的滑坡的是平武县马鞍山滑坡^[15])。在此基础上,把 MODIS NDVI 识别滑坡与目视解译的滑坡区域叠加(图 3)。对 ETM 目视解译结果与 MODIS 自动识别结果定量对比(表 1)。结果表明:MODIS 方法识别出的滑坡面积占

ETM 识别滑坡总面积的 90.79%，二者完全匹配的比例为 55.02%，有 44.98% 的目视解译滑坡没有被识别出来，35.77% 的面积发生误判。从图 3 以及整体解译结果来看，能被 MODIS NDVI 自动正确识别的滑坡体一般面积较大，基本为能完整覆盖一个 MODIS 像素的滑坡体。其中，大于 4 个 MODIS 像元的滑坡其识别精度最高。而研究区较多的不能被识别的滑坡多是由于面积较小而不完全覆盖整个或大部分 MODIS 单像素的小型滑坡造成的。这些误差往往是由于 MODIS 像素覆盖下的地表景观，非滑坡性因素的信息占主导地位所致，这也和采用 MODIS 数据较低的空间分辨率有着直接的关系。

表 1 ETM 目视解译与 MODIS 滑坡识别比较

滑坡识别	面积(m ²)	百分比(%)
ETM	1,832,282	100
总面积	1,663,606	90.79
完全匹配	1,008,132.7	55.02
误判	655,473	35.77
没有识别的	824,149.6	44.98

在保证精度的基础上，将研究区扩大至汶川地震重灾区，包括：甘肃省陇南市武都区、文县，四川省青川县、平武县、江油市、北川县、安县、茂县、绵竹县、什邡县、彭州市、都江堰市、汶川县、理县等 14 个县区，包含了全部的Ⅸ度及以上地震烈度区，大部Ⅷ度区，以及部分Ⅶ度区和小部Ⅵ度区。

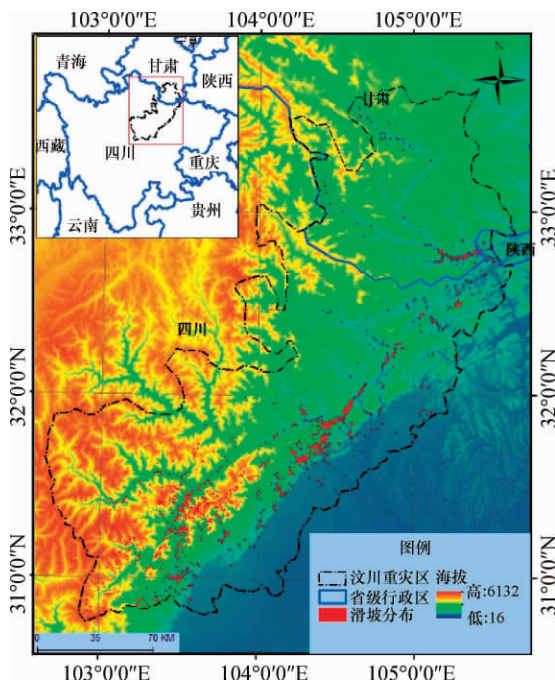


图 4 汶川地震重灾区滑坡识别分布图

通过提出的 NDVI 自动识别技术，得到了汶川重灾区滑坡解译分布。滑坡的发生与坡度有很大关系，在原算法的基础上，考虑了地形坡度对滑坡发生的影响，即对坡度小于 5° 的地形不予考虑滑坡的发生。根据这一条件，最后得到了汶川地震重灾区滑坡识别分布图(图 4)。从结果图来看，汶川重灾区滑坡主要沿东北—西南向狭长带状分布，这与龙门山中央断裂带走向基本一致。

4 结束语

由滑坡造成的植被的扰动可以反映在 MODIS NDVI 像元值的变化上，进而反映在整年的 NDVI 时间序列变化上。对比正常年与地震年份同一像元 NDVI 时间序列的变化，可以识别出植被扰动发生的区域，进而识别出滑坡发生的区域。利用 MODIS 的 16 天 NDVI 时间序列产品识别之前，需要经过 Savitzky-Golay 滤波，以消除时间序列中的噪音和由于云的影响造成的 NDVI 的降低。

将通过 NDVI 时间序列提取出的滑坡分布，和 ETM 目视解译的结果进行了验证，结果表明：MODIS NDVI 时间序列识别出的滑坡与较高分辨率卫星解译的结果有一定的一致性，可以利用较粗分辨率的 MODIS 产品识别滑坡发生的空间分布，然后有针对性地选取滑坡多发区购买高分、超高分影像识别滑坡，从而快速、准确地建立完整的滑坡分布。

美国 MODIS 卫星的重访时间达每天 2 次，可以充分利用这种高时间分辨率的特性，建立间隔更短的 NDVI 时间序列分辨率来识别滑坡。结合正常植被的物候特征，利用 MODIS NDVI 时间序列识别不同时间阶段滑坡的分布，这在滑坡体动态变化研究中具有重要的意义。同时，可以利用单一事件(如震后的某次强降雨)训练特定滑坡区域的 NDVI 序列特征，来提高预测大区域滑坡空间分布的准确性。

尽管可以利用 MODIS 时间序列，快速、连续地监测大面积分布的滑坡灾害，但是灾区土地利用变化对受灾区滑坡监测带来的影响也不容忽视。因此，在滑坡灾害的自动检测研究中，利用灾害发生前后最近时间的卫星影像是十分必要的，这样可以避免灾后土地利用变化对滑坡识别造成的误差，在这一点上，MODIS 的较高时间分辨率有一定的优势。

(下转第 56 页)

5 结束语

本文使用 2000 年 1 月 27 日 Landsat ETM+ 图像,以鄱阳湖周边区域为研究对象,提取了水体信息。使用 $(b2+b3) > (b4+b5)$ 、 $(b2+b3) - (b4+b5) > n$ 、 $(b2+b3)/(b4+b5) > n$ 、 $b2/b5 > n$ 、 $NDWI$ 、 $MNDWI$ 、 $NDWI_3$ 、 EWI 8 个水体指数以及监督分类法对研究区水体进行了提取,表明单一地使用现有的水体提取方法均会混淆一部分地物,特别

是由于研究区处在枯水期,裸露的河滩严重影响了水体提取精度。

根据已有水体提取方法存在的问题,针对工作区域的遥感图像,确定了决策树提取水体的基本工作流程和相关指标,构建了水体的决策树提取模型,将水体与河滩、冰雪、阴影等区分开来,取得了较好的水体提取结果。使用 2003 年 2 月 20 日 Landsat ETM+ 数据进行验证,表明本文的决策树方法具有适用性。

参考文献

- [1] 吴赛,张秋文. 基于 MODIS 遥感数据的水体提取方法及模型研究[J]. 计算机与数字工程, 2005, 22(7): 1-4.
- [2] 周成虎,骆剑承. 遥感影像地学理解与分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 75-78.
- [3] 钟春棋,曾从盛. TM 影像湿地水体信息自动提取方法研究[J]. 水资源, 2007, 28(4): 1-3.
- [4] 肖艳芳,赵文吉,朱琳. 利用 TM 影像 Band1 与 Band7 提取水体信息[J]. 测绘科学, 2010, 35(5): 226-228.
- [5] MCFEETERS S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [6] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [7] 闫霁. 利用增强型水体指数(EWI)和 GIS 去噪音技术提取干旱地区水系信息的研究[J]. 遥感信息, 2007(6): 62-67.
- [8] 都金康,黄永胜,冯学智,等. SPOT 卫星影像的水体提取方法及分类研究[J]. 遥感学报, 2001, 5(3): 214-219.

(上接第 48 页)

参考文献

- [1] WESTEN C J, CASTELLANOS E, KURIAKOSE S L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview[J]. Engineering Geology, 2008(102): 112-131.
- [2] MANTOVANI F, SOETERS R, WESTEN V. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe[J]. Geomorphology, 1996, 15(3-4): 213-225.
- [3] METTERNICHT G, HURNI L, GOGU R. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 98(2-3): 284-303.
- [4] DEWITTE O, Demoulin A. Morphometry and kinematics of landslides inferred from precise DTMs in West Belgium[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005(5): 259-265.
- [5] MARTIN J B, FRANKLIN S. Detecting translational landslide scars using segmentation of Landsat ETM+ and DEM data in the northern Cascade Mountains, British Columbia[J]. Remote Sensing, 2003, 29(40): 510-517.
- [6] JONES L D, WHITWORTH K. Landslide Laser Scanning: A new look at an old problem[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2003(36): 155-157.
- [7] JONES L. Monitoring landslides in hazardous terrain using terrestrial LiDAR: An example from Montserrat[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2006, 39(4): 371-373.
- [8] LIN H, ZHAO Q, JIANG L M, et al. A study of ground deformation in the Guangzhou urban area[J]. Sensors, 2009(9): 503-518.
- [9] HUANG R Q, LI W L. Analysis of the geo-hazards triggered by the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009(68): 363-371.
- [10] XU C, DAI F C, YAO X, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(4): 883-895.
- [11] 许冲,戴福初,肖建章. “5·12”汶川地震诱发滑坡特征参数统计分析[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(4): 147-153.
- [12] 李茂松,武永峰,宋吉青. 植物物候遥感监测研究进展[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(3): 51-58.
- [13] CHEN J, JÖNSSON P, TAMURA M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series dataset based on the Savitzky-Golay filter[J]. Remote Sensing of Environment, 2004(91): 332-344.
- [14] 中国地质环境监测院. 5·12 汶川地震典型地质灾害影像研究[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 122-123.
- [15] 许强,李为乐. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 818-826.