

# 基于图像阈值法的森林雪灾损失遥感估测 ——以云南省为例

吴健生<sup>1</sup>, 陈莎<sup>1</sup>, 彭建<sup>2</sup>

(1.北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055;

2.北京大学城市与环境学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 雪灾是森林生态系统的严重生态干扰之一, 会严重影响林木生长并降低生态系统功能。利用2000-2011年SPOT *NDVI*长时间序列影像数据, 基于SG滤波函数进行时序重建, 采用灾后同期影像的图像阈值法, 以常年多灾的云南省2008年雪灾为例, 进行雪灾森林植被受损评估。评估结果与全国灾情月报中的云南省雪灾范围基本一致, 全省森林雪灾受损面积达12.09%, 主要分布在滇西北的迪庆州、怒江州。对森林雪灾受损程度分析表明, 全省重度受灾县7个, 中度受灾县13个, 轻度受灾县45个。对海拔、坡度、坡向、坡位等地形条件的叠加分析表明, 海拔3300~4000 m、坡度5~15°、处于东坡或东北坡中坡位的森林植被受损最严重。本研究有助于实现森林雪灾损失的快速评估, 对有效规避次生灾害、开展灾后恢复重建规划具有重要意义。

**关键词:** 图像阈值法; 森林植被; SPOT *NDVI*; 雪灾; 云南省

doi: 10.11820/dlkxjz.2013.06.008

## 1 引言

森林是陆地生态系统的主体, 为人类提供赖以生存的物质基础, 更具有水源涵养、土壤保持、固碳释氧、维持生物多样性等重要生态系统服务功能(吴丹等, 2012; 张治军等, 2011)。森林生态系统常受到病虫害、雪灾、火灾、风灾、洪水、山崩等生物性和非生物性的自然干扰(朱教君等, 2004), 其中, 大型雪灾易造成植被弯曲、折枝甚至连根拔起(Petty et al, 1981), 导致森林多方面的生态系统服务功能受损, 甚至远超森林林木直接经济损失(徐凤兰等, 2008)。此外, 积雪消融过程更是加大了滑坡、泥石流等山地地质灾害风险(徐新良等, 2009)。因此, 国外学者很早就开展了雪灾对森林生态系统的影响研究(Mckay et al, 1969; Petty et al, 1981), 2008年南方雪灾则引发了国内学者的极大关注(曹坤芳等, 2010; 陈鹭真等, 2010; 何茜等, 2010; 王秋华等, 2008; 温庆忠等, 2008)。

森林雪灾损失指低温雨雪冰冻灾害造成植被折枝、死亡等而产生的损失。目前, 已有的森林雪灾损失研究方法可以归纳为实地调查法(曹坤芳等, 2010; 陈鹭真等, 2010; 何茜等, 2010; 温庆忠等, 2008)和遥感影像识别法(莫伟华等, 2009; Olthof et al, 2004; 侍昊等, 2012; 王明玉等, 2008; 朱俊凤等, 2010)。实地调查法往往通过设置一定面积的样地进行小班调查, 对生理损伤、群落结构的破坏等方面内容进行评价, 其结果只有小范围微观数据, 难以快速获取区域受灾程度的整体把握。由于森林雪灾损失在遥感影像上直接表现为归一化植被指数(*NDVI*)显著降低, *NDVI*降幅越大, 则植被受损程度越高, 故常采用遥感影像识别法实现大范围森林雪灾损失的快速评估, 目前应用较广。

遥感影像识别法具体包括面向对象聚类法(Olthof et al, 2004; 朱俊凤等, 2010)、受灾前后影像较差法(蔡菊珍等, 2010; 莫伟华等, 2009; 王明玉等, 2008; 姚峰峰等, 2009)等。较具代表性的研究

收稿日期: 2013-02; 修订日期: 2013-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271195)。

作者简介: 吴健生(1965-), 男, 副教授, 主要从事土地利用与景观生态学研究。E-mail: wujws@szpku.edu.cn

通讯作者: 陈莎(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用规划、景观生态学。E-mail: chensha@pku.edu.cn

如 Millward 等(2004)基于 2 期 TM 遥感影像对比评估了美国纽约 1998 年雪灾森林冠层受损情况,将变异值为 10%以上的设定为受损像元,并分析了高程、坡向等因素的影响;莫伟华等(2009)基于受灾前后 2 期 MODIS 影像评估了广西省 2008 年特大雪灾植被受损情况,设定较差阈值为 45%。总体上,已有的森林雪灾受损评估存在以下不足:基于受灾前后后期判别法,难以消除植被自然生长产生的前后期差异部分;遥感识别植被受灾范围阈值的选取有些过于主观,如依据经验直接设定等;而用于对比计算的影像过少,可能存在特例而增加评估结果的不确定性。

云南省多受干旱、雪灾、火灾、病虫害等不同类型的不同程度灾害的影响,平均 1.1 年一次旱灾、3 年一次雪灾,是常年多灾典型地区(白树明等, 2003)。根据云南减灾年鉴,近 15 年来云南省 2000 年和 2008 年雪灾较为严重,尤以 2008 年为最,但鲜见对云南省森林雪灾损失的空间评估。云南省平均海拔约 2000 m, 84% 的地区是山地(张治军等, 2011),实测工作困难且耗时耗力,利用遥感方法提取森林损失范围更为快速有效、简单易行。

本文以云南省为研究区,建立 2000-2011 年 SPOT *NDVI* 时序影像,并进行 Savitzky-Golay(SG)滤波重建,采用灾后多年同一时期长时间序列的图像阈值法,评估森林植被在 2008 年雪灾中折枝、死亡造成损失的严重程度与范围,以期提供一种森林雪灾损失的遥感快速估测方法。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究区概况

云南省位于中国西南边陲,与缅甸、老挝、越南等国接壤,地处  $21^{\circ}8'32''\sim 29^{\circ}15'8''N$ ,  $97^{\circ}31'39''\sim 106^{\circ}11'47''E$ ,总面积 39.4 万  $km^2$ 。云南省森林资源丰富,2008 年森林覆盖率 47.5%,绿针叶林、常绿阔叶林、灌木林及其他天然林广泛分布,珍贵树种多,包括世界仅存 34 株的濒危树种巧家五针松等,总体生态系统服务价值占中国总价值的 11.47%,具有重要的“碳汇”作用(张治军等, 2011)。全省地处低纬度高原,气候及地形条件复杂,2000 年 1 月底遭遇了 30 年一遇雪灾;2008 年 1 月中旬-2 月上旬更是

遭受了 50 年一遇的雪灾,165.6 万  $hm^2$  林木受损。

### 2.2 数据来源与处理

本文所用数据包括两大部分:土地覆被数据和归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*)数据产品。

土地覆被数据来自欧盟联合研究中心空间应用研究所的 Global Land Cover 2000(GLC 2000)全球  $1\ km\times 1\ km$  土地覆被图。GLC 2000 是相关研究中常用的数据,冉有华(2009)等用混淆矩阵、局部验证等方法对国际地圈生物圈计划的全球土地覆被数据集(IGBPDISCover)、美国马里兰大学的全球土地覆被数据集(UMd)、GLC 2000 以及 MODIS 2000 年的土地覆被数据产品(MOD12Q1)等 4 种常用的土地覆被数据集进行对比研究,结果显示 GLC2000 和 MODIS 数据精度较高。从 GLC 2000 土地覆被图中提取出基期(2000 年)森林植被覆盖范围。由于灌木林也是云南省的重要植被类型(张治军等, 2011; 李亮等, 2011),本文提取的森林植被类型包括常绿针叶林、常绿阔叶林、灌木林及其他天然林 4 类(图 1)。

*NDVI* 数据来自比利时的 VITO 研究所提供的免费 SPOT VEGETATION 10 天 *NDVI* 最大值合成产品,空间分辨率为 1 km,时间跨度为 2000-2011 年共 432 期数据,依据所有数据进行时序重建,选用雪灾直接影响结果的 2 月下旬 12 期同期数据进行研究。

*NDVI* 最大值合成法(MVC)能在一定程度上减弱云和气溶胶等噪声的影响,更好的反映植被的生长状况(Holben, 1986),因此本文选用 SPOT VGT *NDVI* 10 天合成产品,文中计算均基于 10 天 *NDVI* 最大值。由于 GLC 2000 土地利用数据也是基于 SPOT VGT 数据得到,本文所用数据具有很好的一致性。

此外,DEM 数据来自美国宇航局(NASA)免费提供的 1 km 分辨率的 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数字地形高程数据集。

### 2.3 *NDVI* 时序重建

*NDVI* 能有效表征植被覆盖度及其健康状况(Spruce et al, 2011),被广泛用于雪灾植被损失研究中(Millward et al, 2004)。对下载到的 SPOT *NDVI* 数据首先要进行预处理,即添加坐标投影信息并将

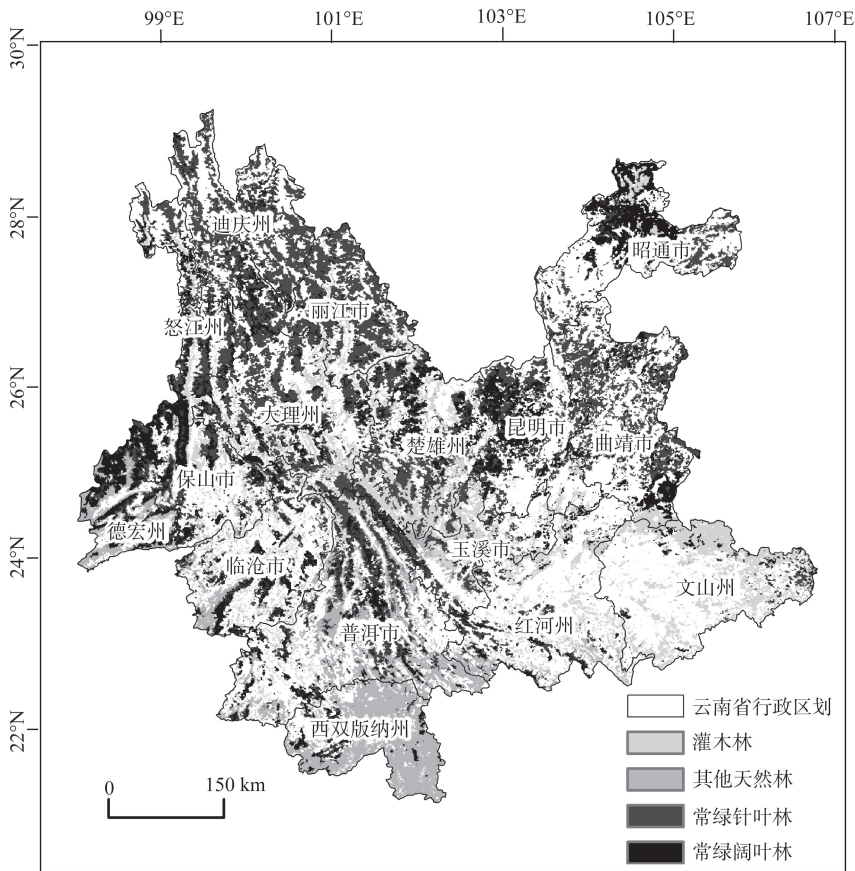


图1 2000年云南省森林植被空间分布

Fig. 1 Distribution of forest in Yunnan Province in 2000

影像灰度值( $DN$ 值)转换为 $NDVI$ 真实值,根据数据说明, $DN$ 值和 $NDVI$ 值之间的转换关系见公式(1),可以用VGTEExtract工具实现多期影像的批量转换。

$$NDVI = 0.004 \times DN - 0.1 \quad (1)$$

SPOT  $NDVI$ 产品虽然通过最大值合成降低了部分噪声,但 $NDVI$ 长时间序列数据仍存在残余噪声和奇异值,增加了多期影像时序分析的不确定性,需要对 $NDVI$ 时间序列数据进行重建(Cihlar et al, 1997; Chen et al, 2004)。在阈值法、滤波平滑法、曲线拟合法3类主流时序重建方法中,滤波平滑法经证明可很好的用于SPOT  $NDVI$ 数据去噪(宋春桥等, 2011)。

基于研究区自然环境特征及研究目标,本文选用在多种植被类型拟合和局部突变信息描述方面具有明显优势的Savitzky-Golay(SG)滤波法(宋春桥等, 2011),并用Jönsson和Eklundh(2011)开发的TIMESAT软件实现(Jönsson et al, 2002, 2004; Eklundh et al, 2011)。该软件主要功能是 $NDVI$ 时间

序列数据的滤波重建及植被生长物候信息的提取,已被应用到多种相关研究中,并被NASA采纳用于MODIS物候产品的数据处理,其处理结果具有较大可靠性(Hird et al, 2009)。

#### 2.4 图像阈值法

由于各年同一时期植被生长条件基本相似, $NDVI$ 值应在一定范围内小幅度波动,其异常变化归因于生长限制因子气象条件的突变或外来干扰。Spruce等(2010)基于此提出了图像阈值法,用来评估美国东部森林植被虫害损失(Spruce et al, 2011)。该方法与遥感影像的图像分割阈值法原理类似,对灾后同期多年时序变化影像对比分析,找出损失年份相对于未损失年份的变化百分比,通过设置阈值来划定受损范围,如公式(2)所述:

$$PDI = \frac{NDVI_{\text{und}} - NDVI_D}{NDVI_{\text{und}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $PDI$ 为像元受损指数,代表损失年份植被归一化植被指数值相对于未损失年份的变化百分比,

$NDVI_0$  为雪灾当年灾后归一化植被指数值,  $\overline{NDVI_{und}}$  为同期其他未受损年份的归一化植被指数多年平均值。

2008年中国南方雪灾集中在1月10日-2月2日,到2月下旬积雪全部消融(蔡菊珍等, 2010),对于灾害频发的云南,为避免其他灾害的影响,又直观及时地反映雪灾的影响结果,本文选取2008年2月下旬这一期影像(为2月下旬9天)最大值合成影像)作为灾后  $NDVI$  影像,其他各年依次选择同期影像纳入运用图像阈值法的时间序列,共12期影像。

由于雪灾具有突发性、局部性、摧毁性等特点,使得局部受灾植被  $NDVI$  值大幅降低(Millward et al, 2004),势必会造成区域整体  $NDVI$  值差异增大。因此,选取表征数据空间离散程度的标准差来确定植被雪灾受损阈值。具体方法为:从像元受损指数  $PDI$  为100%开始以1为步长逐一递减,设定  $[PDI, 100\%]$  之间的像元为受损区,剩余则为未损失像元,计算受灾年未损失像元的标准差,如果小于等于未

受损年份的平均标准差,则此时的  $PDI$  值即为雪灾植被受损阈值。为快速确定阈值,参照最小二乘法原理,首先设置  $PDI$  为50%,则  $[50\%, 100\%]$  之间的像元为损失像元,剩余像元则为未损失像元,计算受灾年未损失像元的标准差,如果小于等于未受损年份的平均标准差,则森林雪灾损失阈值即为50%,否则同理依次设置  $PDI$  为25%、13%或38%等,直到受灾年未损失像元的标准差小于等于未受损年份的平均标准差为止。

### 3 结果与分析

#### 3.1 $NDVI$ 时序重建结果

对12年432期  $NDVI$  进行SG滤波处理,经过反复试验与调整,最终确定参数设置中迭代次数为3,上包络线拟合强度为2和SG滤波滑动窗口大小为5,选择STL replace方法平滑奇异值。对应4种类型植被像元点的SG滤波结果如图2所示,常绿阔

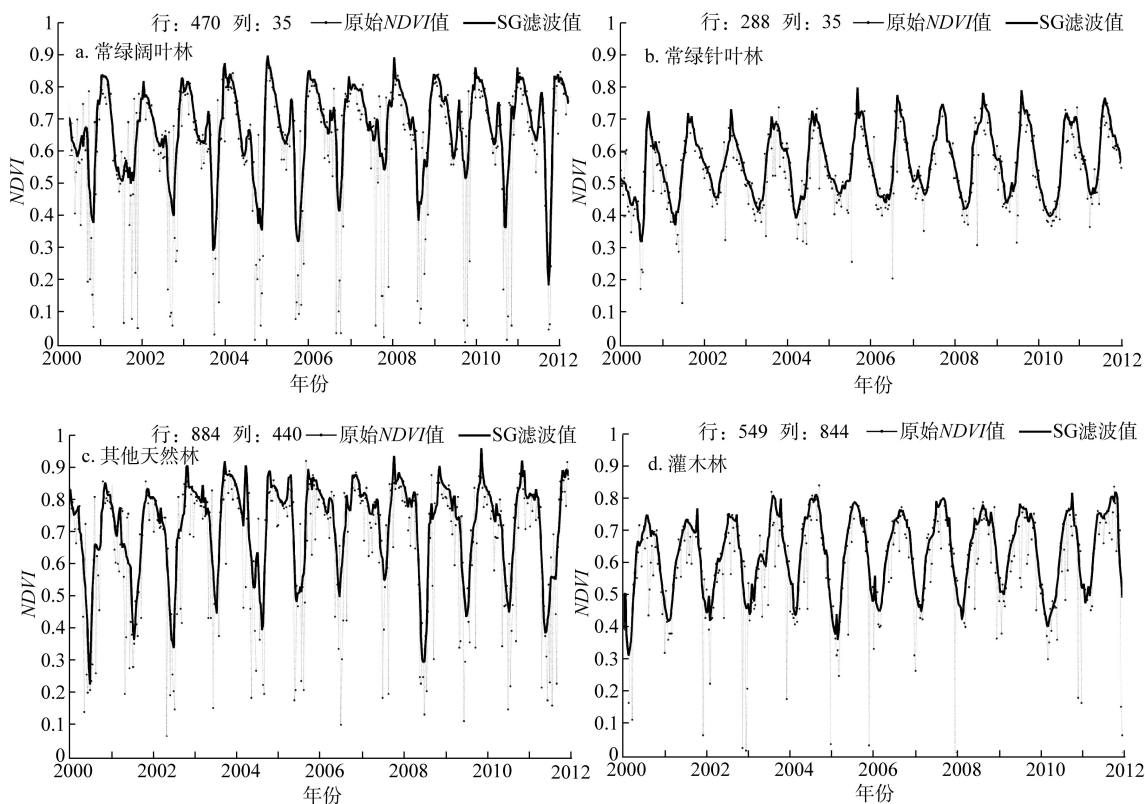


图2 2000-2012年云南省单一森林像元SG滤波曲线(a. 常绿阔叶林;b. 常绿针叶林;c. 其他天然林;d. 灌木林)

Fig.2 SG filtering curve of a single pixel within broad-leaved forest(a), needle leaved forest(b), other natural forest(c) and

shrubs(d) in Yunnan Province during 2000-2012

叶林、常绿针叶林、其他天然林 *NDVI* 逐年变化总体趋势一致但差异明显,而灌木林的总体趋势与其相反, *NDVI* 最小值出现的时间也不一致,说明不同植被的物候期是不一样的。但4类植被 *NDVI* 在2月下旬处于相近水平,一般情况下差异不大,且此时并不是各类植被生长旺盛期, *NDVI* 对植被的解释和SG滤波的效果能达到最佳(李儒等, 2009)。SG滤波总体上提高了 *NDVI* 值,平滑、去除奇异值后整体效果更好。

图2中常绿阔叶林、常绿针叶林、其他天然林 *NDVI* 年内变化特点是夏低冬高,说明夏季植被生长减缓而冬季植被活力反而增强,这与常规认识及在青藏祁连山地区(戴声佩等, 2010)、黄淮海(陈怀亮等, 2011)等地的研究恰好相反,但这正体现了云南植被独特的四季生长特点。计算每旬近12年的 *NDVI* 平均值发现(图3),年内最低值出现在6月下旬

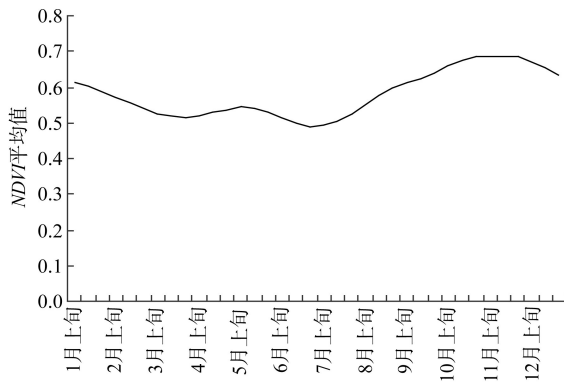


图3 2000-2011年云南省逐旬 *NDVI* 平均值

Fig. 3 Curve of ten day average *NDVI* in Yunnan Province during 2000-2011

旬,而最高值出现在11月中旬,这一规律与李立科(2011)用 SPOT *NDVI* 数据、王金亮等(2010)用 AVHRR *NDVI* 数据在云南所做研究的结果一致。

出现 *NDVI* 夏低冬高的主要原因是云南省山区属亚热带和温带气候,植被生长主要受太阳辐射和降水胁迫(Nemani et al, 2003),夏季降水少而太阳辐射过强,植被生长受到一定抑制,而一般从7、8月份开始进入雨季,水热条件均适合植被的生长。此外,全年 *NDVI* 整体处于较高水平,最低值仍大于0.48,因此可以认为云南省植被全年都处于生长期(王宏等, 2006),这与云南省四季如春的气候特点是相符的。

### 3.2 森林雪灾受损阈值

基于 *NDVI* 时序重建,2000-2011年2月下旬同期各 *NDVI* 影像标准差及平均值计算结果(图4)显示,2000、2008年标准差较为异常,显著高于平均值。根据云南减灾年鉴,在近12年间这一时段也仅有这2年发生了分别为30年一遇和50年一遇的严重雪灾。为排除其他年份可能存在的灾情而不过分依靠统计资料,对比分析 *NDVI* 平均值及标准差,认为标准差相对较小、平均值相对较高的影像表明该影像整体 *NDVI* 值保持在较高水平,这些年份是最有可能未受灾或受灾较小的。因此,选取2003、2006、2007、2009、2010和2011年共6期作为未受灾年份,用ArcGIS软件栅格计算模块计算得到基于像元的6期未损失平均值影像,用来与2008年影像对比计算像元受损指数 *PDI*。通过前述方法计算得到 *PDI* 与2008年同期影像未受损区标准差对应关系(表1)。确定受灾阈值为21%,变化比

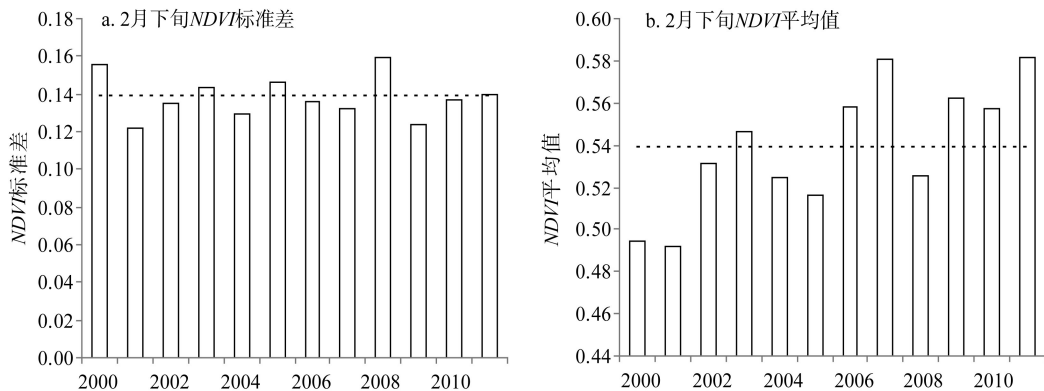


图4 2000-2011年2月下旬 *NDVI* 影像标准差(a)和平均值(b)(虚线为12年平均值)

Fig. 4 Standard deviations(a) and averages(b) of twelve *NDVI* images during 2000-2011

表 1 像元受损指数与 2008 年未受损区标准差对应表  
Tab. 1 Pixel Damage Index corresponding to standard deviation of undamaged pixels in 2008

PDI /%	2008 年未受损区 标准差	与未受损年平均 标准差较差
50	0.148361	0.012830
25	0.138063	0.002532
13	0.125798	-0.009733
24	0.137512	0.001981
23	0.136904	0.001373
22	0.136286	0.000755
21	0.135583	0.000052
20	0.134795	-0.000736

例在[21%, 100%]之间为森林植被受损范围。

### 3.3 森林雪灾受损范围

2008 年 1、2 月全国灾情月报中, 云南省雪灾覆盖范围主要包括北部大部分地区, 以及东部靠近贵州省的部分地区。本文基于图像阈值法识别出的云南省森林雪灾受损范围主要位于云南省西北部、东北部、东部及东南部少部分地区(图 5a), 基本与全国灾情月报中的云南省雪灾覆盖范围一致。但是, 根据 2009 年中国林业年鉴, 2008 年南方雪灾云南省林木受损面积为 165.6 万  $\text{hm}^2$ , 占全省森林总面积

的 9.11%, 而基于图像阈值法估测出的森林受损面积比例则为 12.09%, 略高于地方统计值; 这主要是因为本文包含所有灌木林, 而统计资料中只包含国家规定的特定灌木林, 存在统计口径的差异。

Natural Breaks 分类方法是利用统计学的 Jenks 最优化法得出的分界点, 能够使各级的内部方差之和最小, 常用于生态环境敏感性评价分级中(肖荣波等, 2005)。为区分云南省森林植被受损程度差异, 对森林受灾范围内像元受损指数 PDI 按 Natural Breaks 方法进行分级, 得到  $PDI > 58\%$  为重度受损区、 $36\% < PDI \leq 58\%$  为中度受损区,  $21\% < PDI \leq 36\%$  为轻度受损区, 分别占森林受灾总面积的 15.3%、27.6%、57.1%(图 5a)。总体来看, 迪庆、怒江、昭通、曲靖、文山和红河等 6 州市灾情较为严重, 其中重度受灾区主要分布在滇西北的迪庆州和怒江州, 部分分布在滇东南红河州; 中度受灾区主要分布在东北部的昭通市、曲靖市, 部分分布在东南部的文山州; 全省受灾区主要集中分布于北部和东部外围地区, 中部、西部、南部大部分地区森林受轻度灾害或基本未受雪灾影响。

对比云南省各县受灾情况, 分县统计上述各级森林受损面积占全县森林总面积的比例, 首先将森林植被轻度受灾比例达 1% 以上的划为轻度受灾县; 再根据 Natural Breaks 分级确定其中中度受灾

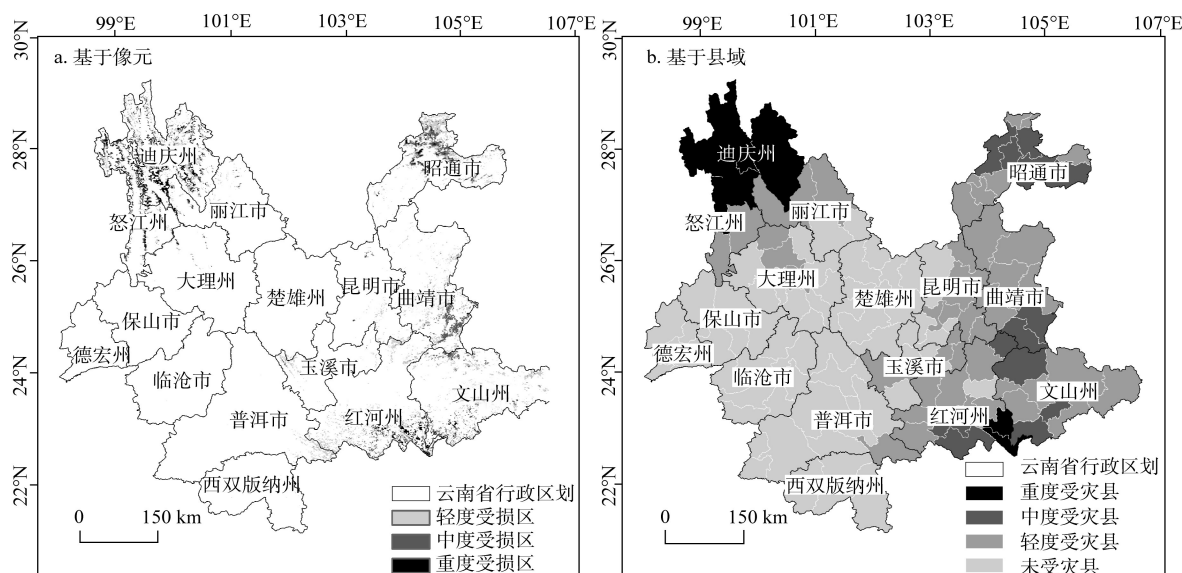


图 5 基于像元(a)和县域(b)的 2008 年云南省森林雪灾受损程度及空间分布

比例达8.7%的为中度受灾县,同理确定重度受灾比例达7.5%的为重度受灾县,其他则为未受灾县;最后得到未受灾县、轻度受灾县、中度受灾县和重度受灾县的空间分布图(图5b)。

其中,重度受灾县有7个,包括西北部迪庆州的德钦县、中甸县、维西傈僳族自治县和怒江州的贡山独龙族怒族自治县、福贡县,以及东南部的屏边苗族自治县和河口瑶族自治县;中度受灾县有13个,主要分布在东北部和东南部,具体包括邵通市北部5县、红河州和文山州均有3县、曲靖市两县;轻度受灾县有45个,分布相对较为集中,成片分布于云南省东部和西北部。

### 3.4 森林雪灾受损的地形特征

许多研究表明地形对森林雪灾危害程度的影响显著(李秀芬等, 2005), 本文的对比分析进一步印证了这一结论。分别统计重度受损、中度受损、轻度受损像元所在地区的海拔、坡度、坡向、坡位(图6), 可以看出: ① 云南省2008年森林雪灾受损主要

发生在海拔1300~2000 m和3300~4000 m范围内, 且重度受损主要发生在海拔3300~4000 m范围, 表明此海拔高度上林木雪荷载能力较差; ② 在坡度小于21°的地方森林植被易受雪灾影响受损, 且随着坡度减小森林受损更严重, 受损范围也在扩大, 在坡度5~15°森林植被受损范围及严重程度达到极大值, 原因在于全省植被主要分布在坡度20°以下; ③ 位于东坡和东北坡坡向上的森林植被受损最多、最严重, 位于北坡和南坡的森林植被受损情况则最小, 这与欧洲中部森林雪灾危害的坡向特征一致(Nykänen et al, 1997), 都与风向关系密切, 迎风坡上植被受损严重; ④ 不同坡位上植被受损程度差异较大, 中坡位上植被受损最重, 其次是上坡位和下坡位, 平坦地面上植被受损程度最轻, 而不同坡位上受损植被比例则是除平坡最低外, 其他坡位上相差不大, 都在12%左右, 说明中坡位上植被受损较多的主要原因在于植被在中坡位上分布较多, 植被受损与坡位关系实际上并不明显。

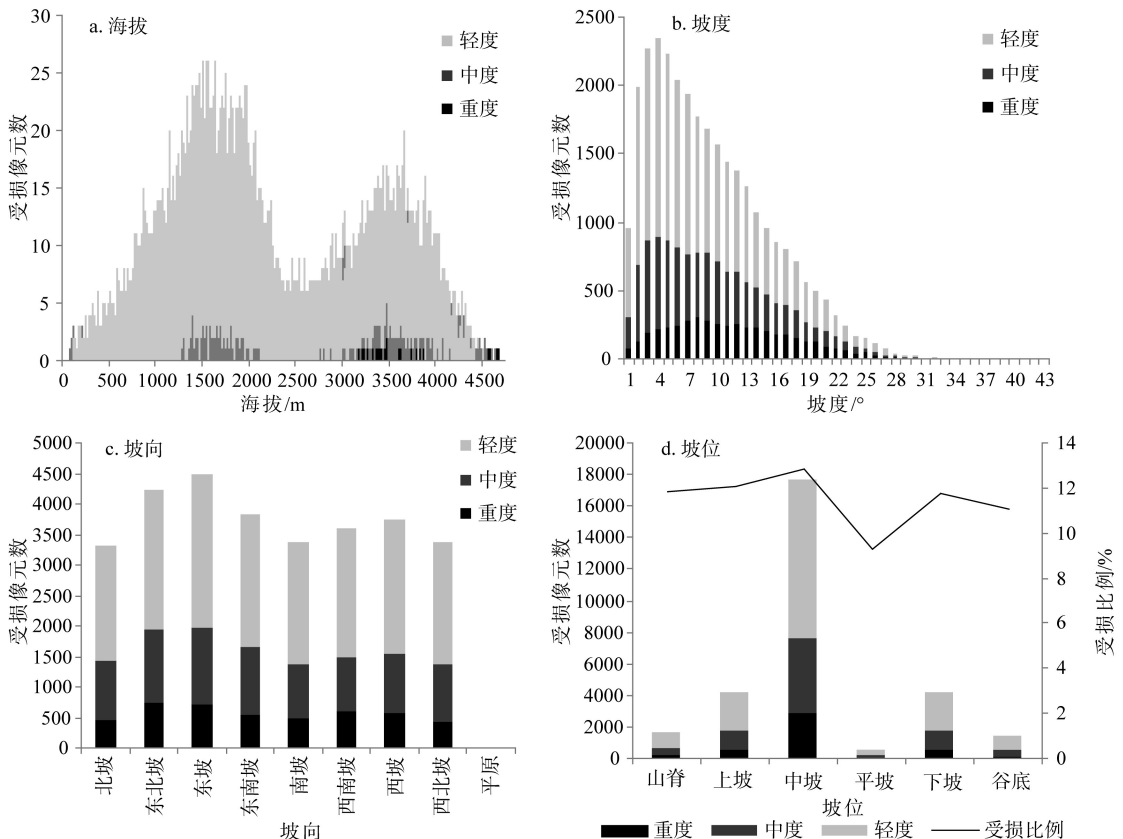


图6 2008年云南省森林雪灾损失区域的地形分布

Fig. 6 Statistic of damage pixels in different topographies in Yunnan Province in 2008

## 4 结论

雪灾对森林生态系统的影响不可忽视,基于遥感技术的大范围快速估测成为重要的发展趋势。本文利用 SPOT NDVI 长时间序列影像数据,基于 SG 滤波函数进行时序重建,采用灾后同期影像的图像阈值法,以云南省为例,进行雪灾森林植被受损评估。相比于目前较常用的受灾前后遥感影像对比法,本文基于灾后多年同期遥感影像的图像阈值法,更适合于常年多灾地区的雪灾植被受损评估,能够实现近乎实时的森林损失快速评估,对有效规避次生灾害及后期恢复重建规划具有重要决策支持意义。

基于图像阈值法的遥感估测结果,与全国灾情月报中云南省雪灾分布范围基本一致,森林受损面积达 12.09%,受损严重森林主要分布在滇西北的迪庆州和怒江州。全省重度受灾县 7 个,中度受灾县 13 个,轻度受灾县 45 个。基于地形的叠加分析表明,海拔 3300~4000 m、坡度 5~15° 的东坡、东北坡上的森植被受雪灾影响损失严重。随着“长防工程”、“天保六大工程”等森林保护项目的实施,云南省自 1999 年起森林覆被范围逐年增加(艾建林等, 2010; 张治军等, 2011),但为了保证影像间的可比性,本文以 2000 年森林植被范围为基准,未考虑之后各年森林植被增加的部分,在一定程度上影响了结果精度。

遥感估测与实地调查是目前自然灾害评估的两大基本途径,各有优势与不足,两者结合已成为当前发展的基本趋势;但本研究在植被受损阈值及受损程度等级确定中主要依据遥感数据序列特征,囿于研究条件而缺乏实地验证,下一步研究有必要强调两种方法的结合,以期提升研究结果精度。此外,像元受损指数 *PDI* 公式中的“同期其他未受损年份的多年平均值”项,受到研究时段的限制,选择不同的时间长度将对 *PDI* 的计算结果产生一定的影响,理论上,同期其他未受损年份越多,*PDI* 结果越可靠。

## 参考文献(References)

Ai J L, Zhao Y F, Wen Q Z, et al. 2010. A study on the changes of forest resources during the three decades in Yunnan 1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

- province. Forest Resources Management, (4): 12-16. [艾建林, 赵元藩, 温庆忠, 等. 2010. 云南省 30 年森林资源变化研究. 林业资源管理, (4): 12-16.]
- Bai S M, Huang Z Y. 2003. Drought characteristics in Yunnan and trend prediction of the next decade. Pearl River, (6): 4-6. [白树明, 黄中艳. 2003. 云南旱灾特点和未来 10 年干旱趋势预测. 人民珠江, (6): 4-6.]
- Cai J Z, He Y, Zhang X W, et al. 2010. Remote sensing monitoring and evaluation of snow cover in Zhejiang Province based on GIS. Meteorological Monthly, 36(4): 85-89. [蔡菊珍, 何月, 张小伟, 等. 2010. 基于 GIS 的浙江省积雪遥感监测与评估研究. 气象, 36(4): 85-89.]
- Cao K F, Chang J. 2010. The ecological effects of an unusual climatic disaster: The destruction to forest ecosystems by the extremely heavy glaze and snow storms occurred in early 2008 in southern China. Chinese Journal of Plant Ecology, 34(2): 123-124. [曹坤芳, 常杰. 2010. 突发气象灾害的生态效应: 2008 年中国南方特大冰雪灾害对森林生态系统的破坏. 植物生态学报, 34(2): 123-124.]
- Chen J, Jönsson P, Tamura M, et al. 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. Remote Sensing of Environment, 91(3): 332-344.
- Chen L Z, Wang W Q, Zhang Y H, et al. 2010. Damage to mangroves from extreme cold in early 2008 in southern China. Chinese Journal of Plant Ecology, 34(2): 186-194. [陈鹭真, 王文卿, 张宜辉, 等. 2010. 2008 年南方低温对我国红树植物的破坏作用. 植物生态学报, 34(2): 186-194.]
- Cihlar J, Ly H, Li Z Q, et al. 1997. Multitemporal, multichannel AVHRR data sets for land biosphere studies: Artifacts and corrections. Remote Sensing of Environment, 60(1): 35-57.
- Chen H L, Liu Y J, Du Z X, et al. 2011. The change of growing season of the vegetation in Huanghe-Huaihe-Haihe region and its responses to climate changes. Journal of Applied Meteorological Science, 22(4): 437-444. [陈怀亮, 刘玉洁, 杜子璇, 等. 2011. 黄淮海地区植被生长季变化及其气候变化响应. 应用气象学报, 22(4): 437-444.]
- Dai S P, Zhang B, Wang H J, et al. 2010. Spatio-temporal variation of vegetation NDVI in the Qilian mountains during the period from 1999 to 2007. Arid Zone Research, 27(4): 585-591. [戴声佩, 张勃, 王海军, 等. 2010. 1999-2007 年祁连山区植被指数时空变化. 干旱区研



- 究, 27(4): 585-591.]
- Eklundh L, Jönsson P. 2011. TIMESAT 3.1 software manual. Lund, Sweden: Lund University.
- He Q, Li J Y, Chen X Y, et al. 2010. Types and extent of damage to *Cunninghamia lanceolata* plantations due to unusually heavy snow and ice in southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34(2): 195-203. [何茜, 李吉跃, 陈晓阳, 等. 2010. 2008年初特大冰雪灾害对粤北地区杉木人工林树木损害的类型及程度. *植物生态学报*, 34(2): 195-203.]
- Hird J N, Mcdermid G J. 2009. Noise reduction of NDVI time series: An empirical comparison of selected techniques. *Remote Sensing of Environment*, 113(1): 248-258.
- Holben B N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11): 1417-1434.
- Jönsson P, Eklundh L. 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*, 40(8): 1824-1832.
- Jönsson P, Eklundh L. 2004. TIMESAT: A program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers and Geosciences*, 30(8): 833-845.
- Li L, Wang Y X. 2011. Analysis of forestry carbon sink and economic value in Yunnan. *China Collective Economy*, (24): 24-25. [李亮, 王映雪. 2011. 云南省森林碳汇能力及经济价值分析. *中国集体经济*, (24): 24-25.]
- Li L K. 2011. Spatio-temporal dynamic of vegetation cover and the response to climate change in Lancang river reaches, Yunnan[D]. Shanghai, China: East China Normal University. [李立科. 2011. 云南澜沧江流域植被时空动态及对区域气候变化的响应[D]. 上海: 华东师范大学.]
- Li R, Zhang X, Liu B, et al. 2009. Review on methods of remote sensing time-series data reconstruction. *Journal of Remote Sensing*, 13(2): 335-341. [李儒, 张霞, 刘波, 等. 2009. 遥感时间序列数据滤波重建算法发展综述. *遥感学报*, 13(2): 335-341.]
- Li X F, Zhu J J, Wang Q L, et al. 2005. Forest damage induced by wind/snow: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 25(1): 148-157. [李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 等. 2005. 森林的风/雪灾害研究综述. *生态学报*, 25(1): 148-157.]
- Mckay G A, Thomson H A. 1969. Estimating the hazard of ice accretion in Canada from climatological data. *Journal of Applied Meteorology*, 8(6): 927-935.
- Millward A A, Kraft C E. 2004. Physical influences of landscape on a large-extent ecological disturbance: The north-eastern North American ice storm of 1998. *Landscape Ecology*, 19(1): 99-111.
- Mo W H, Wang J H, Zhong S Q, et al. 2009. Techniques for monitoring and evaluating the snow and ice disaster base on MODIS model. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(10): 88-93. [莫伟华, 王君华, 钟仕全, 等. 2009. 基于MODIS的冰雪遥感灾害监测与评估技术. *林业科学*, 45(10): 88-93.]
- Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300: 1560-1563.
- Nykanen M L, Peltola H, Quine C, et al. 1997. Factors affecting snow damage of trees with particular reference to European conditions. *Silva Fennica*, 31(2): 193-213.
- Olthof I, King D J, Lautenschlager R A. 2004. Mapping deciduous forest ice storm damage using Landsat and environmental data. *Remote Sensing of Environment*, 89(4): 484-496.
- Petty J A, Worrell R. 1981. Stability of coniferous tree stems in relation to damage by snow. *Forestry*, 54(2): 115-128.
- Ran Y H, Li X, Lu L. 2009. Accuracy evaluation of the four remote sensing based land cover products over China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 31(3): 490-500. [冉有华, 李新, 卢玲. 2009. 四种常用的全球1 km土地覆盖数据中国区域的精度评价. *冰川冻土*, 31(3): 490-500.]
- Shi H, Wang X, Xue J H, et al. 2012. A rapid assessment method for forest disaster based on MODIS/NDVI time series: A case study from Guizhou Province. *Acta Ecologica Sinica*, 32(11): 3359-3367. [侍昊, 王笑, 薛建辉, 等. 2012. 基于MODIS/NDVI时间序列的森林灾害快速评估方法: 以贵州省为例. *生态学报*, 32(11): 3359-3367.]
- Song C Q, Ke L H, You S C, et al. 2011. Comparison of three NDVI time-series fitting methods based on TIMESAT: Taking the grassland in northern Tibet as case. *Remote Sensing Technology and Application*, 26(2): 147-155. [宋春桥, 柯灵红, 游松财, 等. 2011. 基于TIMESAT的3种时序NDVI拟合方法比较研究: 以藏北草地为例. *遥感技术与应用*, 26(2): 147-155.]
- Spruce J P, Sader S, Ryan R E, et al. 2011. Assessment of MODIS NDVI time series data products for detecting forest defoliation by gypsy moth outbreaks. *Remote Sensing of Environment*, 115(2): 427-437.
- Wang H, Li X B, Ying G, et al. 2006. The methods of simulat-

- ing vegetation growing season based on NOAA NDVI. *Progress in Geography*, 25(6): 21-32. [王宏, 李晓兵, 莺歌, 等. 2006. 基于NOAA NDVI的植被生长季模拟方法研究. *地理科学进展*, 25(6): 21-32.]
- Wang J L, Gao Y. 2010. RS-based analysis on vegetation temporal changes in 1982-2002 of Yunnan Province. *Yunnan Geographic Environment Research*, 22(6): 1-7. [王金亮, 高雁. 2010. 云南省近20年植被动态变化遥感时序分析. *云南地理环境研究*, 22(6): 1-7.]
- Wang M Y, Shu L F, Zhao F J, et al. 2008. Quantity analysis of forest fuel under the impacts of snow damage in south of China: Case study in Hunan Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 44(11): 69-74. [王明玉, 舒立福, 赵凤君, 等. 2008. 中国南方冰雪灾害对森林可燃物影响的数量化分析: 以湖南为例. *林业科学*, 44(11): 69-74.]
- Wang Q H, Shu L F, Dai X A, et al. 2008. Effects of snow and ice disasters on forest fuel and fire behaviors in the southern China. *Scientia Silvae Sinicae*, 44(11): 171-176. [王秋华, 舒立福, 戴兴安, 等. 2008. 冰雪灾害对南方森林可燃物及火行为的影响. *林业科学*, 44(11): 171-176.]
- Wen Q Z, Wei X F, Zhao Y F, et al. 2008. Impact of the freezing rain and snow disasters on five plantations in the southeast Yunnan. *Scientia Silvae Sinicae*, 44(11): 23-27. [温庆忠, 魏雪峰, 赵元藩, 等. 2008. 雨雪冰冻灾害对滇东南5种人工林的影响. *林业科学*, 44(11): 23-27.]
- Wu D, Shao Q Q, Liu J Y. 2012. Assessment of water conservation function of forest ecosystem in Taihe County, Jiangxi Province. *Progress in Geography*, 31(3): 330-336. [吴丹, 邵全琴, 刘纪远. 2012. 江西泰和县森林生态系统水源涵养功能评估. *地理科学进展*, 31(3): 330-336.]
- Xiao R B, Ouyang Z Y, Wang X K, et al. 2005. Sensitivity of rocky desertification and its spatial distribution in southwestern China. *Chinese Journal of Ecology*, 24(5): 551-554. [肖荣波, 欧阳志云, 王效科, 等. 2005. 中国西南地区石漠化敏感性评价及其空间分析. *生态学杂志*, 24(5): 551-554.]
- Xu F L, Qian G Q, Yang L Z. 2008. Economical assessment of the loss value brought by the blizzard and frozen disasters to the forest in the ecosystem services: Take the disaster forest of Fujian Province as the example. *Scientia Silvae Sinicae*, 44(11): 193-201. [徐凤兰, 钱国钦, 杨伦增. 2008. 冰冻灾害造成森林生态服务价值损失的经济评估: 以福建省受灾森林为例. *林业科学*, 44(11): 193-201.]
- Xu X L, Su F Y, Zhuang D F, et al. 2009. Remote sensing monitoring of impacts of southern ice and snow process on eco-environment in 2008: A case study in Zixing County, Hunan Province. *Journal of Geo-information Science*, 11(2): 237-243. [徐新良, 苏富岩, 庄大方, 等. 2009. 2008年南方冰雪过程对生态环境影响的遥感监测: 以湖南省资兴市为例. *地球信息科学学报*, 11(2): 237-243.]
- Yao F F, Zhang S H, Yang Y, et al. 2009. Evaluating the impact of freezing rain and snow disaster on forestry in Jiangxi. *Journal of Natural Resources*, 24(9): 1657-1666. [姚峰峰, 张时煌, 杨医, 等. 2009. 冰冻雨雪灾害对江西林业影响的评估技术探讨. *自然资源学报*, 24(9): 1657-1666.]
- Zhang Z J, Tang F L, Zhou H B, et al. 2011. The assessment of ecosystem function and ecosystem services value in Yunnan. *Forestry Construction*, (2): 3-9. [张治军, 唐芳林, 周红斌, 等. 2011. 云南省森林生态系统服务功能及其价值评估. *林业建设*, (2): 3-9.]
- Zhu J F, Qian J P, Liao G S, et al. 2010. Forest damage detection from an freezing rain and snow using remote sensing based on object-oriented method and spatial analysis in Nanling Mountain areas. *Journal of Mountain Science*, 28(4): 478-486. [朱俊凤, 钱峻屏, 廖广社, 等. 2010. 基于对象方法的南岭山区雨雪冰冻灾害遥感检测与空间分析. *山地学报*, 28(4): 478-486.]
- Zhu J J, Liu Z G. 2004. A review on disturbance ecology of forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15(10): 1703-1710. [朱教君, 刘足根. 2004. 森林干扰生态研究. *应用生态学报*, 15(10): 1703-1710.]

## Assessment of forest damage due to ice storm using image thresholding techniques: A case study of Yunnan Province

WU Jiansheng<sup>1</sup>, CHEN Sha<sup>1</sup>, PENG Jian<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China; 2. Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Ice storms are one of the severe disruptions to forest ecological systems, causing vegetation loss and reduction of the ecological systems' functions. For this reason it is vital to assess the damages to forests after ice storms. Using SPOT Normalized Difference Vegetation Index(*NDVI*) time serial images of Yunnan Province of China during 2000-2011, forest damage caused by ice storms in 2008 was assessed based on image thresholding techniques of post-storm *NDVI* time series after Savitzky-Golay filtering by TIMESAT software. The damage threshold was determined by the difference of standard deviation between the years with ice storms and those without, which eventually turned out to be 21%. The range of extracted forest damage is almost consistent with the ice storm extent of Yunnan in the national monthly disaster report, therefore the result is reliable. The destroyed vegetation accounted for 12.09% of the total area of forest. Forest within Diqing County and Nujiang County, in northwest Yunnan, suffered the most losses. On the whole, seven counties took the worst hit by the natural adversity, while thirteen were moderately affected and forty five slightly affected. The most severe damage of forest occurred at the elevation of 3300 m to 4000 m, the slope of 5 to 15 degree, the middle slope position and the east or northeast aspect. Even so, it had little to do with slope position because the most of vegetation is located in the middle slope position. In-situ measurement was not employed here to verify the results because of time and money limits, which compromised the overall accuracy. However, with the acceptable precision, the research method can be used as a real-time forest loss assessment, which is of great significance for taking effective measures to avoid secondary impacts and starting the process of recovery.

**Key words:** image thresholding techniques; forest; SPOT *NDVI*; ice storm; Yunnan Province