

# 火灾和地质灾害对森林的干扰及其恢复评估

蒋宇威<sup>1</sup>, 李登秋<sup>2\*</sup>

(1. 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江杭州 311300; 2. 福建师范大学福建省亚热带资源与环境重点实验室, 福建师范大学地理科学学院, 福建福州 350007)

**摘要** 以浙江省杭州市临安区森林植被作为研究对象, 选择火灾、泥石流和滑坡 3 种典型森林干扰类型, 利用 1984—2016 年所有可用 Landsat 遥感影像, 采用分段谐波模型拟合方法, 对干扰发生前后植被的生长状况进行表征, 对不同干扰类型导致的植被生长状况及干扰后恢复过程进行评估。结果表明: 3 种干扰事件均导致植被归一化指数 (NDVI) 呈现显著下降, 火灾和泥石流导致植被的变化程度分别为 22.7% 和 20.5%, 而滑坡则导致植被的下降程度达 42.7%。灾后植被均呈现快速恢复, 但过程存在一定差异, 火灾、泥石流和滑坡对植被所造成的破坏分别需要 4、6 和 5 年恢复到灾前植被覆盖水平。时间序列 Landsat 数据能够较好地表征干扰植被变化过程, 可为监测和评估不同干扰事件对植被生长的影响提供依据。

**关键词** 地质灾害; 森林火灾; 植被干扰; NDVI; 时间序列

**中图分类号** S 771.8 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2021)14-0106-04

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.14.027



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Impacts of Fires and Geological Disasters on Forests and the Restoration Assessment

JIANG Yu-wei<sup>1</sup>, LI Deng-qi<sup>2\*</sup> (1. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystem and Carbon Sequestration of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 311300; 2. Fujian Provincial Key Laboratory for Subtropical Resources and Environment, School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007)

**Abstract** Using all available Landsat images between 1984 and 2016, this study selected three typical forest disturbance types (fire, mudslide and landslide) to assess their impacts on vegetation coverage in Lin'an District, Hangzhou City, Zhejiang Province. The piecewise harmonic model was used to fit the time series Landsat Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which can characterize the vegetation coverage condition before and after the disturbance. The results showed that the NDVI decreased significantly after the three disturbance events occurred. The change degrees in the fire, mudflow and landslide areas were 22.7%, 20.5% and 42.7%, respectively. Vegetation recovered rapidly after the disasters, but there were some differences in the processes. The areas disturbed by fire, mudflow and landslide needed 4, 6 and 5 years to recover to the pre-disturbance coverage level, respectively. Dense time series Landsat data can represent the vegetation change process, and provide a basis for evaluating the impact of different disturbances on vegetation coverage.

**Key words** Geological disasters; Forest fire; Vegetation disturbance; NDVI; Time series

干扰普遍存在于森林生态系统, 是森林群落演替的驱动力之一<sup>[1]</sup>。根据干扰起因, 森林干扰可分为自然干扰和人为干扰 2 种类型<sup>[2]</sup>。地质灾害与火灾是森林自然干扰的重要组成部分, 地质灾害是指由于自然或人为作用在地球表层比较强烈地破坏人类生命财产和生存环境的岩土体移动事件, 地质灾害的发生往往会导致森林被掩埋毁坏。森林火灾是指失去人为控制, 在林地内自由蔓延和扩展, 直接减少森林面积, 破坏森林结构和森林环境, 导致森林生态系统失衡、森林生物量下降、生产力减弱的自然灾害。准确表征森林干扰的破坏程度以及植被恢复过程, 对于保护和管理森林生态系统具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。

随着遥感技术的发展, 时间序列遥感已成为森林动态监测的重要手段<sup>[5-8]</sup>。目前, 基于时间序列遥感数据对植被变化监测已有大量研究<sup>[9]</sup>, 如罗火钱等<sup>[10]</sup>采用多时相遥感影像评价了火烧迹地的森林恢复情况; 梁超等<sup>[11]</sup>以灾害前后 2 期中分辨率成像光谱仪 (moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 数据提取了灾害导致的植被破坏区, 发现泥石流对植被的破坏程度最严重, 崩塌次之, 滑坡的破

坏程度相对最低, 且植被的破坏程度与海拔、坡度均有关系。侍昊等<sup>[12]</sup>基于 2005—2008 年 MODIS NDVI 构建了森林灾害评估体系, 以探测森林资源损失的空间分布范围和灾害等级。不同灾害对植被干扰程度不同, 植被覆盖度对灾后损害响应存在滞后性, 受损植被恢复率与水系距离、海拔等相关, 且存在明显的空间差异<sup>[13-14]</sup>。长时间序列遥感能够持续地监测森林变化特征, 为森林生产力与森林碳储量评估提供有效的数据支撑<sup>[15]</sup>, 但目前相关研究较多集中于单一的森林干扰, 且多以中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 等低分辨率或多期 Landsat 数据为主, 对于我国亚热带森林地区小尺度、破碎化的干扰事件难以进行有效监测, 且仅依靠多期遥感数据难以有效表征植被干扰和恢复过程。笔者基于历史可用 Landsat NDVI 数据和分段谐波模型, 分析滑坡、泥石流和火灾 3 种干扰类型对亚热带森林植被的干扰程度以及灾后植被恢复过程。

## 1 材料与方法

**1.1 地质灾害与火灾数据** 以浙江省杭州市临安区为调查区域, 临安区森林覆盖率达 78.2%, 森林资源丰富, 且气候季节性明显, 是森林火灾易发区域。临安区以中低山丘陵为主要地貌, 雨量充沛季节, 易发生滑坡、泥石流等地质灾害, 尤以山核桃种植区清凉峰镇与昌化镇为主要易发区域。基于野外调查及历史数据确定 3 个典型干扰区域, 包括 1 个火灾区域, 1 个滑坡区域及 1 个泥石流区域 (表 1)。结合野外调

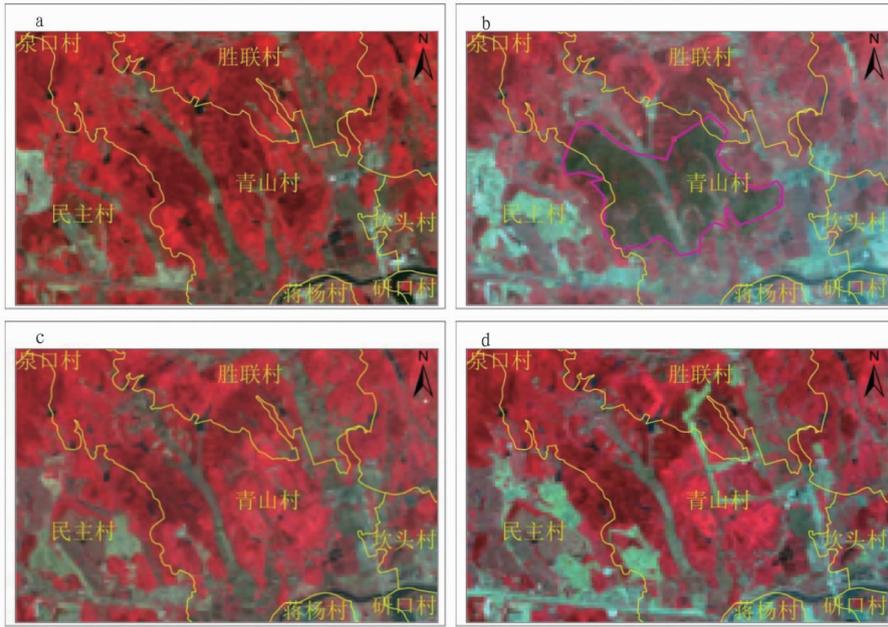
**基金项目** 国家自然科学基金 (41701490); 国家重点研发计划 (2016-YFC0503302)。

**作者简介** 蒋宇威 (1995—), 男, 浙江台州人, 从事灾害评估与时间序列遥感数据分析研究。\* 通信作者, 副教授, 博士, 从事时间序列遥感森林变化监测研究。

**收稿日期** 2020-11-06

查数据、Google Earth 以及 Landsat 历史影像,明确每个干扰事件的影响范围(图 1),用于计算每期 Landsat 影像干扰区

域 NDVI 平均值。



注:a.2006年青山村遥感影像;b.2008年青山村火灾后遥感影像;c.2009年青山村遥感影像;d.2010年青山村遥感影像

Note:a.Remote sensing image of Qingshan Village in 2006;b.Remote sensing image after fire of Qingshan Village in 2008;c.Remote sensing image of Qingshan Village in 2009;d.Remote sensing image of Qingshan Village in 2010

图1 青山镇火灾发生前后 Landsat 假彩色影像(近红外、红光和绿光波段组合)

Fig.1 Landsat false color images before and after the fire in Qingshan Town (combination of near infrared, red and green bands)

表1 地质灾害和火灾信息

Table 1 Information on geological hazards and fires

干扰类型 Disturbance type	干扰地点 Disturbance location	干扰时间 Disturbance time	经度 Longitude	纬度 Latitude
火灾 Fire	青山镇青山村、 民主村、胜联村	2008-03-02	119.81°E	30.27°N
泥石流 Mudflow	昌化镇后葛村里 树湾	2005-09-03	119.18°E	30.26°N
滑坡 Landslide	清凉峰镇林竹村 梓朋坞	2009-08-13	118.95°E	30.10°N

**1.2 时间序列 Landsat NDVI 数据** Landsat 卫星是由美国航空航天局(NASA)发射的用于探测地球资源与环境的系列地球观测卫星系统,自1972年7月23日以来,已发射8颗卫星。该研究通过 USGS 下载了覆盖研究区的1984—2016年云量小于80%的所有 Landsat TM/ETM+/OLI 数据(图2),共收集1045幅 Landsat L1T 影像数据(其中,轨道 P119/R039 483幅,轨道 P118/R041 563幅)。Landsat L1T 产品已经经过大气校正、几何校正、云和阴影的检测,采用式(1)对每景数据计算 NDVI,来表征植被生长状况。NDVI 能够综合反映植物生长、覆盖、生物量和植被种类等情况,通过植被 NDVI 值的变化,可以分析区域内植被的生长及其变化特征,并能监测干扰后的植被恢复情况。

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - R) / (\text{NIR} + R) \quad (1)$$

式中,NIR 为近红外波段反射率,R 为红波段反射率。

**1.3 研究方法** 根据每个干扰事件的发生范围和1984—2016年每期 Landsat NDVI 数据,利用 R 语言提取出每景影

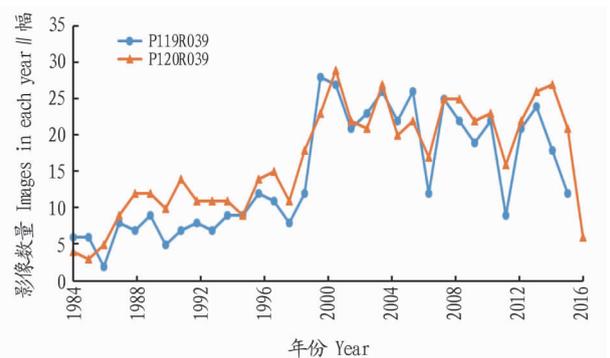


图2 1984—2016年研究区 Landsat 数据数量

Fig.2 Landsat images in each year from 1984 to 2016

像中干扰区域的 NDVI 平均值,采用时间序列谐波模型对每个干扰事件发生前后时间序列 NDVI 进行拟合[式(2)],模型系数由普通最小二乘法估计,采用公式(3)~(5)评估干扰对森林植被的影响。在时间序列模型中, $\beta_i$  是表征植被生长的总体特征, $a_i$  和  $b_i$  代表了物候学和日照角差异引起的 NDVI 的年内变化, $c_i$  捕获 NDVI 的年内变化。

$$\hat{p}(i, t)_{\text{NDVI}} = \beta_i + a_i \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + b_i \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + c_i t \quad (2)$$

$$\text{NDVI}_{\text{start},i} = a_i + t_{\text{start},i} \times c_i \quad (3)$$

$$\text{NDVI}_{\text{end},i} = a_i + t_{\text{end},i} \times c_i \quad (4)$$

$$A = \text{NDVI}_{\text{end},i} - \text{NDVI}_{\text{start},i+1} \quad (4)$$

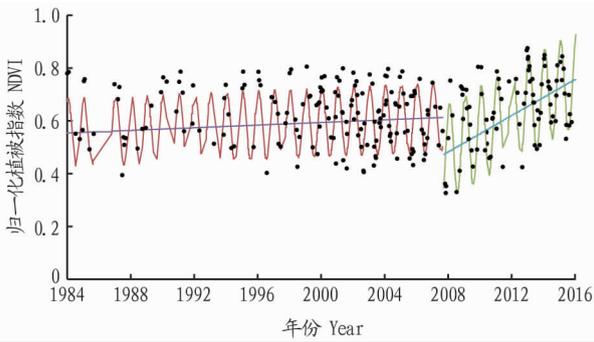
$$A_r = A / \text{NDVI}_{\text{end},i} \times 100 \quad (5)$$

其中, $\beta_i$  和  $c_i$  代表截距和年内变化(斜率)系数, $t_{\text{start},i}$  和  $t_{\text{end},i}$

代表干扰前(后)时间序列 NDVI 起始点(儒略日)和终止点(儒略日)。NDVI<sub>start,i</sub>和 NDVI<sub>end,i</sub>代表干扰前(后)时间序列起始点和终止点剔除季节影响后的 NDVI。A 表示干扰导致的 NDVI 净变化, A<sub>r</sub> 表示干扰导致的 NDVI 相对变化程度。

## 2 结果与分析

**2.1 火灾对植被的干扰过程** 时间序列 Landsat NDVI 和谐波模型拟合结果表征了火灾对植被的影响过程(图 3),火灾发生前,该区域以杉木林为主,NDVI 处于较稳定的季节波动状态,拟合曲线的斜率接近于 0,表明在未遭受明显干扰的情况下,植被变化主要表现为季节波动。火灾后发生后(2008年),时间序列 NDVI 表现出明显的转折点,NDVI 在火灾发生后显著降低,由灾害前的 0.61 降低为 0.47(表 2),植被在受到干扰后恢复过程明显,NDVI 呈现显著上升趋势,且 2008—2016 年一直处于快速恢复状态,在 2012 年基本恢复到干扰前水平,但干扰后植被 NDVI 的波动幅度强于干扰发生前,主要原因在于火灾发生后,部分森林转变为农田、苗木,使得植被季节变化增强。



注:黑点表示时间序列 Landsat NDVI 值,曲线表示 NDVI 数值经过谐波模型拟合后的曲线,直线表示 NDVI 拟合曲线的趋势线  
Note:The black points represent the extracted Landsat NDVI values, the curve represents the fitted NDVI by harmonic model, and the straight lines represent the trends of the fitted NDVI

图 3 1984—2016 年森林火灾对植被的干扰及其恢复过程

Fig.3 Impacts of fire on vegetation and the recovery process from 1984 to 2016

表 2 3 种干扰事件发生前后植被 NDVI 变化特征

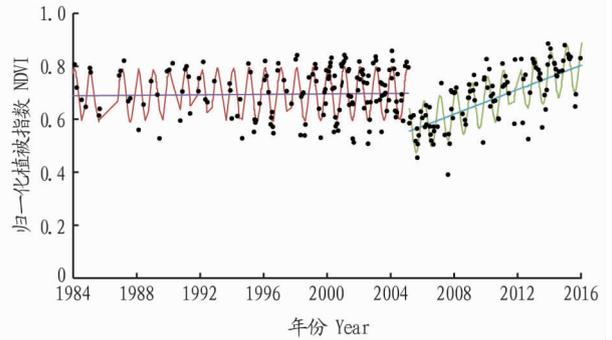
Table 2 NDVI and changes in three disturbance events

干扰类型 Disturbance type	干扰时间 Disturbance time	NDVI		NDVI 变化率 Change rate//%	恢复时间 Time of recovery
		干扰前 Before disturbance	干扰后 After disturbance		
火灾 Fire	2008-03	0.61	0.47	22.7	2012-04
泥石流 Mudflow	2005-09	0.70	0.56	20.5	2011-12
滑坡 Landslide	2009-08	0.59	0.33	42.7	2014-06

## 2.2 地质灾害对植被的干扰过程

**2.2.1 泥石流对植被的干扰过程。**图 4 表征了泥石流对植被的影响及其恢复过程,灾害发生前,植被覆盖度相对较好,NDVI 围绕 0.7 呈现季节性波动,该地点由于突降特大暴雨造成山体塌方,由此引发泥石流,泥石流导致 NDVI 显著下降,由灾害前的 0.70 降低为 0.56(表 2),与火灾干扰相类似,

泥石流发生后植被呈现快速恢复,于 2011 年左右恢复至灾前水平,与灾害发生前相比 NDVI 季节性波动无明显差异。

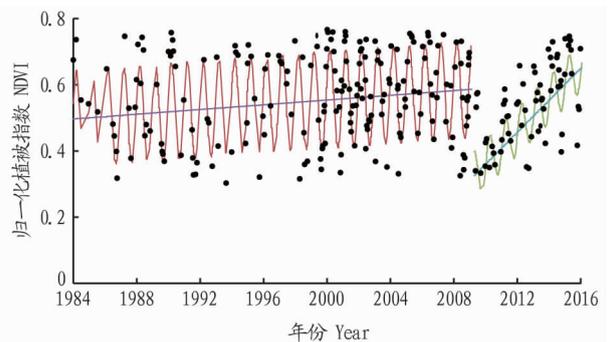


注:黑点表示时间序列 Landsat NDVI 值,曲线表示 NDVI 数值经过谐波模型拟合后的曲线,直线表示 NDVI 拟合曲线的趋势线  
Note:The black points represent the extracted Landsat NDVI values, the curve represents the fitted NDVI by harmonic model, and the straight lines represent the trends of the fitted NDVI

图 4 1984—2016 年泥石流对植被的干扰及其恢复过程

Fig.4 Impacts of mudflow on vegetation and the recovery process from 1984 to 2016

**2.2.2 山体滑坡对植被的干扰过程。**图 5 为滑坡对植被的影响过程,该地区地势较陡(坡度达到 30~50°),土层厚度达 3~8 m,地质环境条件脆弱;存在人类工程活动影响,切坡修路改变了坡面的原始状况,降低了山体的稳定性,加上受“莫拉克”台风影响导致的持续降雨,使土体水分处于过饱和状态,从而引发滑坡。相比于火灾发生范围,滑坡发生区域面积较小,在 Landsat 上仅表现为 2 个像元,滑坡发生前 NDVI 均值处于 0.5 左右,NDVI 呈现一定的增加趋势,滑坡导致 NDVI 下降较为显著,由灾害前的 0.59 降低为 0.33,变化率达 42.7%(表 2),滑坡发生后植被恢复速度显著,灾害发生后 NDVI 于 2014 年恢复到灾前水平。



注:黑点表示时间序列 Landsat NDVI 值,曲线表示 NDVI 数值经过谐波模型拟合后的曲线,直线表示 NDVI 拟合曲线的趋势线  
Note:The black points represent the extracted Landsat NDVI values, the curve represents the fitted NDVI by harmonic model, and the straight lines represent the trends of the fitted NDVI

图 5 1984—2016 年山体滑坡对植被的干扰及其恢复过程

Fig.5 Impacts of landslide on vegetation and the recovery process from 1984 to 2016

## 3 结论与讨论

该研究通过长时间序列密集遥感数据表征植被长期变

化及干扰事件对植被生长过程的影响,基于谐波模型拟合能够较好地消除时间序列异常值和季节波动对植被变化监测的不利影响,通过对火灾、泥石流和滑坡 3 种典型干扰事件影响下的时间序列 NDVI 分析,发现 3 种干扰事件均导致 NDVI 显著降低,其中火灾和泥石流导致植被的变化程度分别为 22.7% 和 20.5%,滑坡则导致植被的下降程度达 42.7%。灾后植被均呈现快速的恢复,但恢复过程存在一定差异,火灾、泥石流和滑坡对植被所造成的破坏分别需要 4、6 和 5 年恢复到灾前植被覆盖水平。

该研究中火灾所导致的干扰面积较大,而泥石流和滑坡则仅发生在有限的几个像元内,且存在一定的混合像元,可能会低估地质灾害对植被的破坏能力。泥石流发生的区域,虽然 NDVI 表明植被覆盖良好,但由于处于山核桃种植区,林下植被多被清理,水土流失严重,是发生泥石流的重要原因。在火灾发生区域,部分像元灾后土地利用类型发生了变化,由森林转为农田、苗木和建设用地,使得整个火灾区域的植被恢复更为复杂,更为详细地评估火灾对植被的影响需要在像元尺度开展。此外,部分像元干扰发生后,NDVI 呈现持续下降的趋势,表明干扰发生后植被呈现持续恶化,这些特征需在具体的灾害评估中进一步明确其影响因素。

#### 参考文献

- [1] 于立忠,朱教君,张艳红,等.森林干扰度评价[J].生态学杂志,2009,28(5):976-982.
- [2] 高伟,韩孟孟,辛秀,等.干扰理论及其对森林资源的影响[J].中国城市

- 林业,2009,7(5):16-18.
- [3] 刘孝富,王文杰,李京,等.灾后生态恢复评价研究进展[J].生态学报,2014,34(3):527-536.
- [4] MENG Y Y, LIU X N, WU L, et al. Spatio-temporal variation indicators for landscape structure dynamics monitoring using dense normalized difference vegetation index time series[J/OL]. Ecological indicators, 2019, 107[2020-04-28]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105607>.
- [5] 李洛晔,沈润平,李鑫慧,等.基于 MODIS 时间序列森林扰动监测指数比较研究[J].遥感技术与应用,2016,31(6):1083-1090.
- [6] MUNROE D K, SOUTHWORTH J, TUCKER C M. Modeling spatially and temporally complex land-cover change: The case of western Honduras[J]. Professional geographer, 2004, 56(4):544-559.
- [7] KENNEDY R E, COHEN W B, SCHROEDER T A. Trajectory-based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics[J]. Remote sensing of environment, 2007, 110(3):370-386.
- [8] POTAPOV P V, TURUBANOVA S A, HANSEN M C, et al. Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000-2010, with Landsat ETM+ data[J]. Remote sensing of environment, 2012, 122:106-116.
- [9] ZHU Z, ZHANG J X, YANG Z Q, et al. Continuous monitoring of land disturbance based on Landsat time series[J/OL]. Remote sensing of environment, 2020, 238[2020-04-28]. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.009>.
- [10] 罗火钱,陈文惠.火烧迹地森林恢复的植被指数时间序列特征谱研究[J].四川林勘设计,2012(1):23-30.
- [11] 梁超,赵廷宇,史常青,等.基于 NDVI 的汶川大地震前后北川县次生地质灾害区植被破坏评估[J].中国水土保持科学,2013,11(4):86-92.
- [12] 侍昊,王笑,薛建辉,等.基于 MODIS/NDVI 时间序列的森林火灾快速评估方法:以贵州省为例[J].生态学报,2012,32(11):3359-3367.
- [13] 李京忠,曹明明,邱海军,等.汶川地震区灾后植被恢复时空过程及特征:以都江堰龙溪河流域为例[J].应用生态学报,2016,27(11):3479-3486.
- [14] 王爱爱,臧淑英,王翠珍,等.重建 NDVI 时间序列及火后森林恢复时空动态分析[J].哈尔滨师范大学自然科学学报,2017,33(4):54-61.
- [15] 沈文娟,李明诗.基于长时间序列 Landsat 影像的南方人工林干扰与恢复制图分析[J].生态学报,2017,37(5):1438-1449.

(上接第 105 页)

#### 参考文献

- [1] 赵金龙.广西桉树人工林的生态服务功能研究[D].南宁:广西大学,2011.
- [2] 杨民胜,彭彦.中国桉树纸浆材现状与发展趋势[J].纸和纸浆,2006,25(S1):17-20.
- [3] 刘晓蔚.桉树人工林复合经营模式综合效益评价体系建设及综合效益评价[D].南宁:广西大学,2012.
- [4] 国家林业局.林业产业政策要点[A].2007.
- [5] 汪利燕.桉树人工林生态效应分析[J].广西林业科学,2010,39(3):165-167.
- [6] 刘晓蔚,蒋燧,刘秀.广西桉树人工林复合经营模式综合效益评价体系的构建[J].西部林业科学,2013,42(4):96-99.
- [7] 何龙.桉树林木资产评估技术研究[D].长沙:中南林业科技大学,2011.
- [8] 高学政,慕宗昭.巴西林业与人工林的集约经营[J].山东林业科技,2008,38(3):110-111.
- [9] 庞正轰.巴西桉树人工林考察报告[J].广西林业,2006(5):39-41.
- [10] 蒋云安,谢守鑫,靳爱仙,等.巴西新一代人工桉树林经营策略及其启示[J].林业资源管理,2018(6):125-129.
- [11] 张国武,罗建中,尹国平.澳大利亚·巴西桉树人工林经营特点及其启

- 示[J].安徽农业科学,2009,37(7):2965-2967.
- [12] 黄玉梅.桉树人工林地力衰退及其成因评述[J].西部林业科学,2004,33(4):21-26.
- [13] 陶玉华,冯金朝,马麟英,等.柳州市短周期桉树人工林生态系统碳储量研究[J].中国农学通报,2012,28(7):80-84.
- [14] 邱荣虎.桉树人工林的可持续发展性研究[J].南方农业,2015,9(15):109-110.
- [15] 苏晨辉.湛江桉树人工林经济、社会效益评价研究[J].桉树科技,2018,35(2):21-26.
- [16] 国家林业局与草原局.国家储备林建设规划(2018-2035年)[A].2018.
- [17] 杜阿朋,张婧,谢耀深.深圳市桉树人工林生态效益量化评估研究[J].桉树科技,2012,29(1):13-17.
- [18] 李忠伟,陈少雄,吴志华,等.桉树人工林的固碳放氧功能和价值分析:以樟木头林场为例[J].桉树科技,2008,25(1):11-14.
- [19] 何国强.云南省思茅市森林资源生态效益计量与经济评价[J].思茅师范高等专科学校学报,2005,21(3):18-21.
- [20] 徐大平,张宁南.桉树人工林生态效应研究进展[J].广西林业科学,2006,35(4):179-187,201.
- [21] 邓燾.海南省热带天然林生态效益评估和补偿机制研究[D].儋州:华南热带农业大学,2007.