

老挝 VIIRS 活跃火的主要自然地理要素特征

刘怡媛¹, 李鹏^{2,3}, 肖池伟^{2,3}, 刘影¹, 饶滴滴^{2,3}

(1. 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 利用美国国家航空航天局火灾信息资源管理系统(FIRMS)VIIRS V1 活跃火、先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型(ASTER GDEM)、MODIS NDVI/LSWI与土地覆被数据产品(FROM-GLC), 基于GIS定量分析老挝2012—2017年从分省到国家不同空间尺度活跃火频次的动态变化, 并重点分析2015厄尔尼诺年活跃火频次及其与海拔、坡度、植被-水分(NDVI、LSWI)指数、土地覆被等主要自然地理要素的相关特征。结果表明: ①老挝活跃火频次呈先增后减的趋势, 峰值在2015厄尔尼诺年, 主要集中在上、中寮, 其中琅勃拉邦、沙耶武里与沙湾拿吉三省居前三位, 而万象市、塞公和赛宋本则居后三位。②老挝2012—2017年活跃火发生频次与地形因素(海拔、坡度)的关系基本相同, 活跃火集中在海拔1000 m以下、坡度小于30°的低山-丘陵区。其中, 上寮活跃火集中分布在500~1000 m、10~30°的斜陡坡山地, 中、下寮集中在500 m以下、2~20°的缓斜坡丘陵。③活跃火高度集中在旱季, 以3月、4月最多, 并集中分布在NDVI为0.4~0.8和LSWI为0.2~0.6的中高覆盖度植被区。④老挝活跃火主要发生在森林这一土地覆被类型中, 且以上寮最为集中, 而中寮多以农田、草地和灌丛活跃火为主。综上, 基于自然地理要素的活跃火特征分析可以有效识别其发生类型, 即老挝活跃火主要由刀耕火种农业所引起。

关键词: 活跃火; 地形; 植被-水分指数; 土地覆被; 成因-类型; 刀耕火种农业

DOI: 10.11821/dlyj020190029

1 引言

热带活跃火在全球的发生频率日益加剧, 已对全球陆生、水生和大气系统造成重大影响^[1]。在微观尺度上, 活跃火通过植被燃烧、温度升高改变土壤的理化性质, 直接影响植被生长^[2,3], 从而改变植被和土壤的结构和组成^[4]。在区域尺度上, 活跃火可降低表层土壤吸收和保持水分的能力使侵蚀加剧、并改变生态演替方向及速率^[5], 进而影响区域水量和水质^[6]; 而其颗粒物排放则污染空气并降低其质量, 直接或间接造成了人类严重的生命威胁和财产损失^[6]。在全球尺度上, 活跃火对大气和生物地球化学循环以及地球辐射收支也有重大影响^[7], 生物质的燃烧是地球系统变化的一种广泛而重要的动因, 这导致了对局部、区域和全球活跃火数据分析的持续需求^[8]。

目前, 美国国家航空航天局火灾信息资源管理系统 (Fire Information for Resource

收稿日期: 2019-01-11; 修订日期: 2019-07-11

基金项目: 中国科学院地理科学与资源研究所“秉维”优秀青年人才计划 (2018RC201); 国家自然科学基金面上项目 (41971242); 中国博士后科学基金 (2019M660777)

作者简介: 刘怡媛 (1994-), 女, 江西瑞金人, 硕士, 从事资源遥感研究。E-mail: liuyiyi163@163.com

通讯作者: 李鹏 (1984-), 男, 江西永新人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 从事资源地理与国土资源遥感研究。E-mail: lip@igsrr.ac.cn

Management System, FIRMS) 提供了近乎实时的活跃火灾位置矢量信息, 数据来源于中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 和可见光红外成像仪 (Visible Infrared Imager Radiometer Sensor, VIIRS)。FIRMS 活跃火数据已在火灾状况评估 (火烧强度^[9]、消耗的生物量^[10]、烟雾排放^[11]、烟羽扩散^[12]等评估)、经济损失评估^[13]、大气污染评价^[14,15]、气候变化模拟^[15,16]等方面取得了一定的应用与推广。活跃火数据虽然能提供动态监测的数据基础, 但对于活跃火成因 (如山区刀耕火种、平原秸秆焚烧或森林野火等) 仍缺乏相关深入分析。本文在评价老挝2012—2017年活跃火信息动态变化基础上, 以全球2015厄尔尼诺特征年老挝活跃火数据为基础, 利用地形 (海拔、坡度)、植被-水分指数 (NDVI、LSWI) 与土地覆被等自然地理要素共5个指标, 分析活跃火的地形、植被-水分指数与土地覆被的相关特征, 并界定活跃火成因或类型组成。

2 研究区概况

老挝位于13°54'N~22°05'N、100°10'E~107°30'E之间 (图1), 是中南半岛唯一的内陆国家, 国土面积23.68万km²。根据老挝统计年鉴, 老挝 (又称寮国) 分上寮、中寮和下

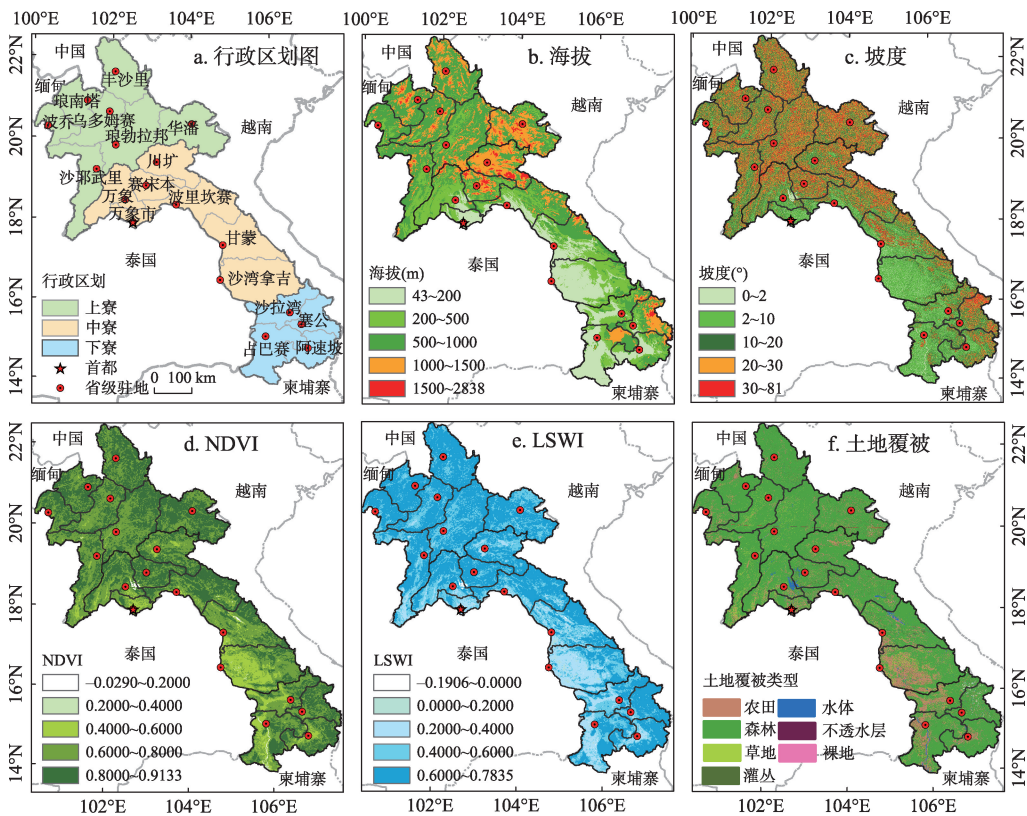


图1 研究区示意

Fig. 1 Maps of the study area

注: 该图基于国家测绘地理信息局标准地图 (审图号: GS(2019)1703号) 绘制, 底图无修改。

叠加提取自2.0版本GADM数据库 (www.gadm.org) 中的老挝省级边界。

寮, 沙耶武里、琅勃拉邦和华潘(含3省)以北共7省为上寮; 沙湾拿吉(含)以北与沙耶武里、琅勃拉邦和华潘以南的6省1市为中寮; 沙湾拿吉以南4省为下寮。老挝整个国土包括四类地形: 山地、高原、丘陵和平原谷地。其中山地和高原占到80%以上, 丘陵次之, 平原谷地较少。老挝的森林覆盖率约为53%。其中, 上寮多为山地高原, 地势高、起伏大, 向南缓慢降低; 中寮多低山丘陵和平原谷地, 河谷间有局部平原; 下寮西部为平原谷地, 东部为高原, 除高原外围较陡之外, 地势起伏较小。老挝属热带-亚热带季风气候, 年均气温25℃左右, 年均降雨量约1800 mm。全年分为雨季(5—10月)和旱季(11月至次年4月), 雨季降雨多, 空气湿度大; 旱季受干燥的东北季风影响, 旱季降雨量只有全年的13%左右。

老挝是中南半岛人口最少的国家, 2017年总人口为690万。经济发展水平落后, 人均国内生产总值2387.39美元, 三大产业, 即农林业、工业与服务业占GDP的比例分别为18.28%、34.87%、46.85%。农业是支撑国民经济建设与发展的基础产业, 而老挝刀耕火种农业又是其中重要的土地利用类型之一^[17-20], 火烧是清除休耕植被用于后续耕作的常见现象^[21]。目前, 这是老挝尤其是北部山区古老而广泛存在的农业耕作形式, 其土地利用主要包括土地清理、农业耕作和休耕(用于植被与土壤恢复)3个阶段^[17-20]。

3 数据来源与研究方法

3.1 老挝2012—2017年FIRMS VIIRS V1活跃火产品

火灾信息资源管理系统(FIRMS, <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms>)是由美国国家航空航天局(NASA)和联合国粮食和农业组织(FAO)共同开发, 目的是提供全球近乎实时的活跃火位置数据。这些数据包括中分辨率成像光谱仪(MODIS)和可见光红外成像仪(VIIRS), 两者在热点检测方面都表现出良好的一致性。其中, VIIRS数据因其375 m的空间分辨率改进了MODIS在对小区域监测的不足^[22]。因此, 于2012年1月20日发布的VIIRS数据非常适合于支持火灾管理以及其他相关的科学应用。本文获取了老挝2012—2017年共6年的VIIRS活跃火位置矢量数据。VIIRS活跃火地点矢量数据包括经纬度、亮度、温度、时间、辐射功率等相关信息。

3.2 老挝ASTER GDEM数据产品

先进星载热发射和反射辐射仪(ASTER)是Terra卫星(1999年12月18日发射)上一种空间分辨率更高的先进多光谱数据源。GDEM Version 2 (V2)于2011年10月17日由NASA和日本经济贸易产业部门联合发布。GDEM以1弧秒的空间分辨率覆盖了83°N~83°S之间的地表, 占地球地表总面积的99%。GDEM产品包括两个压缩文件: DEM和质量评估(QA)。此外, GDEM V2采用Geo TIFF格式, 具有地理经纬坐标系和WGS84/EGM 96大地水准面垂直参考系统。GDEM V2产品虽然可能包含站点级别的异常值, 但是全局产品的水平精度在95%, 置信级别下为30 m^[23]。老挝海拔在43~2838 m之间, 根据地貌单元海拔划分标准, 将其分为5个级别(图1b、图1c), 分别是43~200 m(对应土地占比16.75%)、200~500 m(21.85%)、500~1000 m(39.36%)、1000~1500 m(19.82%)和1500 m以上(2.22%)。老挝坡度在0~81°之间, 参考坡度分级^[24]结合老挝实际数据情况, 将其分为5个级别, 分别是平地0~2°(相应土地占比3.71%)、缓坡2~10°(32.28%)、斜坡10~20°(31.50%)、陡坡20~30°(22.21%)和峭坡30°以上(10.30%)。

3.3 老挝MODIS植被指数产品

中分辨率成像光谱仪(MODIS)是搭载在Terra/Aqua卫星上的重要传感器。其中归一化植被指数(NDVI)可直接下载, 地表水分指数(LSWI)是根据Terra传感器提供的

近红外 (NIR) 和短波红外 (SWIR) 波段地表反射率值计算而成, 空间分辨率为 1 km, 时间尺度为逐月。该数据集为 MOD13A3, 属于第 3 级产品 (L3), 采用正弦曲线 (Sinusoidal) 投影, 已经过定位/定标、边缘畸变等校正。MOD13A1 数据 (V006) 来源于美国国家航空航天局计划 (NASA) EarthData 平台, 可根据研究需求申请与下载。接着对 NDVI 和 LSWI 以 0.2 为间隔同样分为 5 个级别 (图 1d、图 1e)。

3.4 老挝土地覆被数据产品

土地覆被数据 (图 1f) 来源于国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据共享服务平台 (<http://www.geodata.cn>), 分辨率为 30 m 的全球土地覆盖数据集 FROM-GLC (2015 年), 包括全球 2015 年 10 类一级分类 (农田、森林、草地、灌丛、湿地、水体、苔原、不透水层、裸地和云/雪) 和 25 类二级分类的地表覆盖类型, 数据集建设旨在为研究不同分辨率下不同土地覆盖类型在全球地表覆盖的分布特征提供支撑。该数据集的原始数据包括: Landsat 5/7/8、中国高分卫星、资源卫星、环境卫星和 SRTM 地形数据等, 采用 UTM 投影系统及 GCS_WGS_1984 地理坐标系统, 数据类型为栅格 (TIF 格式), 数据精度真实可靠。本研究仅采用一级分类, 老挝土地覆被共包含一级分类中的七类, 占比分别是森林 (53.42%)、农田 (25.54%)、水体 (11.53%)、草地 (5.61%)、灌丛 (2.94%)、不透水层 (0.68%) 和裸地 (0.27%)。

3.5 基于 GIS 的空间统计与分析

利用老挝 2012—2017 年逐年 VIIRS 活跃火矢量点、ASTER GDEM、逐月 MODIS NDVI/LSWI 与土地覆被数据产品, 基于 ArcGIS 10.5 空间分析工具分别提取活跃火矢量点对应的海拔、坡度、NDVI、LSWI 以及覆被类型, 并按上、中、下寮区域和省级边界划分。最后, 通过 Excel 数据透视表统计各区域和省级单元在海拔、坡度、NDVI、LSWI 以及土地覆被类型各分级区间对应的活跃火频数。为了突出相应特征, 海拔以 10 m 为步长, 坡度以 0.5° 为步长, NDVI 和 LSWI 以 0.01 为步长, 土地覆被以一级分类的类型为单元分别计算相应活跃火频数。具体数据处理流程如图 2 所示。

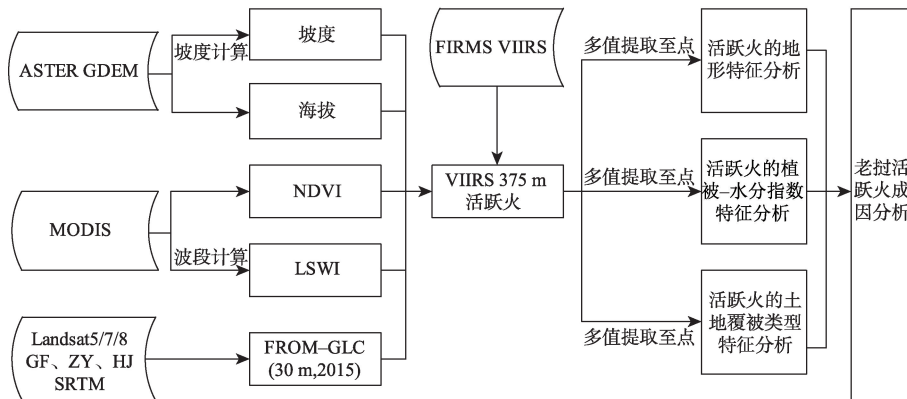


图2 本研究数据处理流程

Fig. 2 Data processing flow chart in this study

4 结果分析

4.1 2012—2017年老挝VIIRS V1活跃火时空格局特征

2012—2017年老挝活跃火频次 (图 3) 先增加后减少, 多年平均为 13.40 万次, 峰值出现在 2015 厄尔尼诺年 (15.30 万次), 最小值出现在 2017 年 (12.70 万次)。2012—2017

年上寮活跃火频次呈现波动减少趋势, 从2012年的7.37万次减至2017年的5.03万次, 多年平均为6.84万次; 中寮活跃火变化趋势与整个老挝一致, 多年平均为4.58万次, 最大值出现在2015年(5.69万次), 最小值在2017年(3.60万次); 下寮活跃火频次呈现波动变化的趋势, 多年平均数为2.02万次。就2015厄尔尼诺年来看, 上寮、中寮与下寮活跃火数占比依次为47.55%、37.27%与15.18%。老挝活跃火主要集中在上寮和中寮。就分省而言, 老挝各省活跃火数平均值为0.85万次, 其中琅勃拉邦、沙耶武里与沙湾拿吉活跃火数居

前三位, 活跃火数分别为1.67万次、1.48万次和1.41万次, 而万象市、塞公和赛宋本活跃火数位列末三位, 分别为0.21万次、0.30万次和0.34万次。值得注意的是, 尽管2015年出现了厄尔尼诺现象, 但其引起活火现象未见明显高于其他年份。

4.2 2015厄尔尼诺年老挝活跃火的地形特征

4.2.1 活跃火海拔特征

在时间序列上看, 2012—2017年老挝活跃火发生频数的高低与海拔的关系基本一致(图4a)。活跃火频次在海拔2300 m以下均有出现, 在170 m左右达到峰值。除2015年偏高、2017年偏低外, 海拔200~1000 m之间活跃火频数基本维持在1000次左右较高水平。而1000 m以上活跃火频次逐渐减少, 在2000 m以上活跃火频次仅零星发生。由于时间序列上的地形特征基本一致, 故选取发生厄尔尼诺的特征年份2015年进行活跃火地形特征分析。老挝活跃火频次集中在海拔1000 m以下, 共13.2万次, 占比高达86.10%, 其中200 m以下、200~500 m和500~1000 m的活跃火占比分别为17.87%、28.61%和39.62%, 1000~1500 m之间占比13.16%, 1500 m以上仅占到0.74%。

从区域上来看(图5a), 上寮活跃火频数呈正态分布, 集中分布在500~1000 m, 占上寮的60.65%, 其次是200~500 m和1000~1500 m占上寮的比例分别为20.91%和17.41%, 上寮活跃火发生频数峰值出现在630 m左右。中寮活跃火在200 m以下、200~500 m、500~1000 m和1000 m以上占比分别为27.73%、40.43%、21.65%和10.19%, 活跃火频数峰值出现在170 m左右, 次一级峰值在550 m左右。下寮活跃火频次集中分布在500 m以下, 占下寮活跃火数的73.24%, 其中200 m以下占比49.56%, 500~1000 m和1000 m以上分别占比为17.84%和8.91%, 峰值也出现在170 m。

从省级行政单元上看, 除沙耶武里活跃火数集中在200~500 m之外, 以琅勃拉邦为典型的上寮省份, 活跃火都集中在500~1000 m。除赛宋本活跃火在各海拔梯度分布较为均匀和川圹活跃火集中在500~1500 m之外, 以沙湾拿吉为典型的中寮省份活跃火集中在500 m以下。除塞公省活跃火集在各海拔梯度分布较为均匀外, 以占巴塞为代表的下寮省份活跃火集中在500 m以下的地区。根据活跃火发生次数以及最高频次, 选取更能突

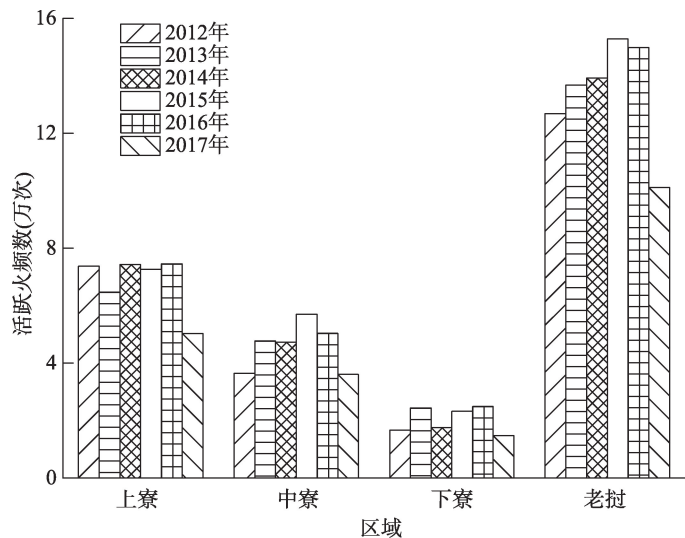


图3 2012—2017年老挝活跃火频数柱状

Fig. 3 Annual changes of Visible Infrared Imaging Radiometer (VIIRS) active fire frequency in Laos during 2012-2017

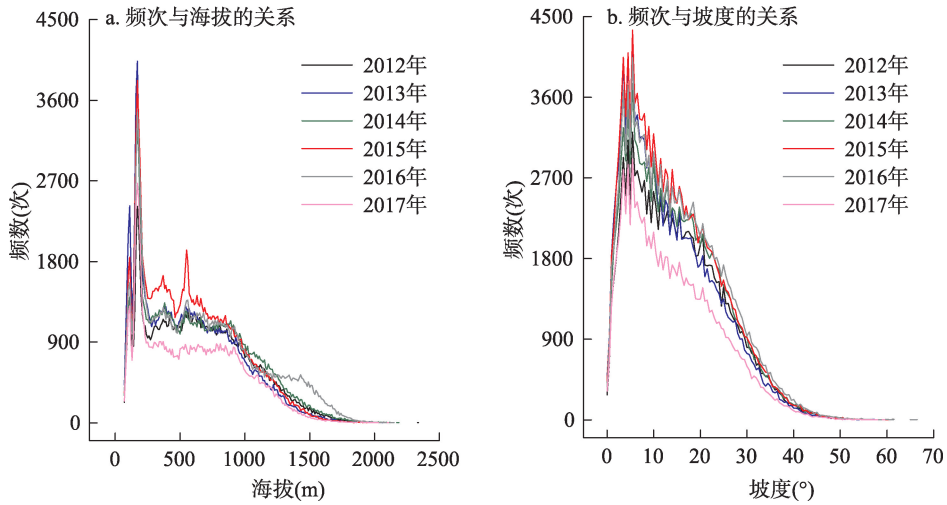


图4 2012—2017年老挝活跃火频数与海拔、坡度的关系

Fig. 4 The relationship between active fire frequency and slope elevation and gradient in Laos from 2012 to 2017

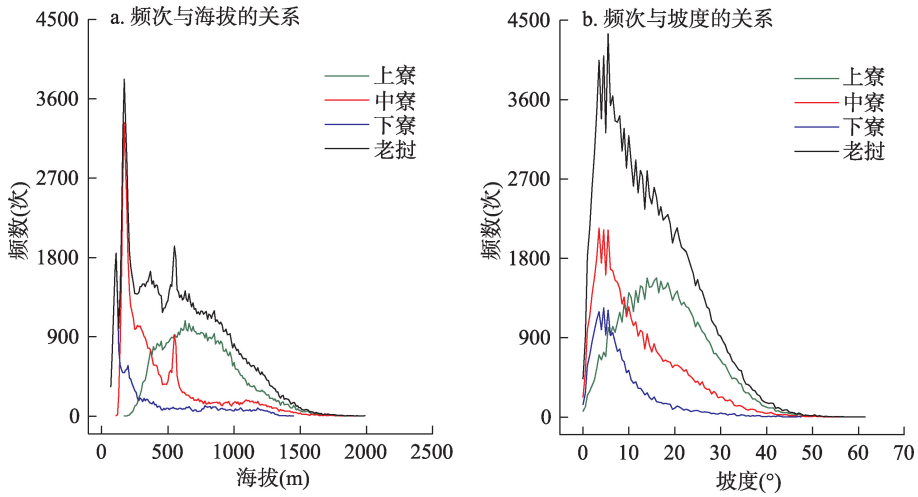


图5 2015年老挝及各区域活跃火发生频数与海拔、坡度的关系

Fig. 5 Relationship between occurrence frequency of active fires and topographical factors (elevation and slope) in Laos and various regions in 2015

出特征的上寮琅勃拉邦和沙耶武里，中寮沙湾拿吉和下寮占巴塞4个典型省份分别揭示活跃火发生频数与海拔的关系（图6a）。

基于活跃火分布与海拔的统计分析，老挝活跃火集中在1000 m以下海拔。参照地形的海拔特征，老挝活跃火主要出现在丘陵（500 m以下）与低山（500~1000 m），而中高山（1000 m以上）区域活跃火现象很少，且随着海拔增加而持续减少。

4.2.2 活跃火坡度特征 类似的，2012—2017年老挝活跃火发生频数的高低与坡度的关系基本一致（图4b）。老挝活跃火频次在坡度0~65°均有出现，从平地起，活跃火数随着坡度的增加而增加，峰值出现在5°左右，峰值过后随着坡度的继续增加活跃火发生数逐步减少，大于30°的陡坡活跃火频次仅零星发生。同样，选取2015年的数据进行空间上的差异分析。老挝活跃火频次集中在20°以下的坡度，共11.2万次，占老挝活跃火总数的

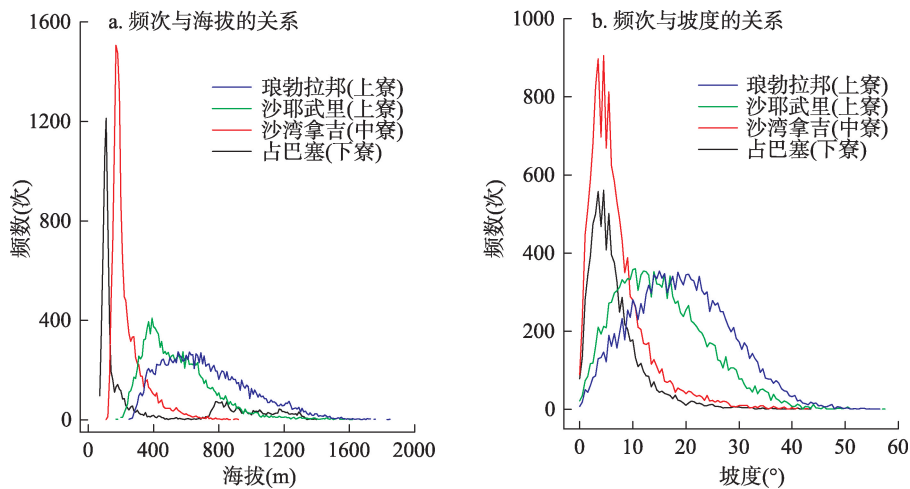


图6 2015年老挝部分省份活跃火发生频数与海拔和坡度的关系

Fig. 6 Relationship between occurrence frequency of active fires and topographical factors (elevation and slope) in four provinces of Laos in 2015

比例为73.56%，其中在0~2°、2~10°和10~20°间活跃火数占比分别为5.17%、36.08%和32.32%，而20~30°和大于30°的占比分别为19.48%和6.95%，活跃火发生频数的峰值出现在5°左右。

从区域来看(图5b)，上寮活跃火发生频数呈正态分布，在10~20°活跃火数最多占比39.57%，其次是2~10°和20~30°的活跃火数占上寮的比例分别为20.50%和28.20%，接着是小于2°和大于30°的活跃火数占比分别为1.48%和10.25%，上寮活跃火发生频数的峰值出现在16°左右。中寮活跃火集中在坡度2~10°，占中寮活跃火数的45.70%，其次是10~20°和20~30°分别占比为28.12%和13.94%，2°以下和30°以上仅占到7.48%和4.76%，在5°左右活跃火发生频数达到峰值。下寮活跃火频次集中分布在2~10°，占下寮活跃火数的61.23%，其次是2°以下和10~20°占比分别为11.02%和19.93%，大于20°占比仅7.81%，峰值也是出现在5°左右。

从省级行政单元上看(图6b)，以琅勃拉邦和沙耶武里为代表的上寮省份集中分布在10~20°之间。中寮除赛宋本、万象和川圹各坡度活跃火点分布较为均匀，以沙湾拿吉为代表的省份活跃火集中在2~10°。以占巴塞为代表的下寮省份活跃火集中在2~10°。

基于活跃火分布与坡度的统计结果，可推断老挝活跃火集中在1000 m以下海拔。参照坡度等级的划分^[24]，老挝活跃火主要出现在缓坡(2~10°)、斜坡(10~20°)和陡坡(20~30°)，而对于平地(0~2°)和峭坡(大于30°)活跃火现象很少。

4.3 2015厄尔尼诺年老挝活跃火植被-水分指数特征

老挝活跃火发生具有很强的旱季(11月至次年4月)与雨季(5月至10月)差异特征(图7)，绝大多数集中发生在旱季，雨季活跃火频次很少。2015年老挝旱季活跃火数为14.6万次，占全年活跃火总数的94.75%，其中以3月和4月最多，两月之和占全年的82.24%，而1月、2月、11月和12月占比分别为4.17%、7.40%、0.21%和0.73%。雨季中，以5月(由旱季向雨季过渡时段)活跃火数最多(0.72万次)，在全年占比也仅为4.69%，而其余5个月之和仅占到0.55%，这些活跃火可能与农田秸秆焚烧有关。老挝雨季除活跃火发生频数本来较少外，雨季多阴雨的天气也对VIIRS等光学卫星的火烧监测造成了一定限制。

2015年老挝旱/雨季活跃火与NDVI、LSWI关系分析表明(图8)，活跃火发生地对

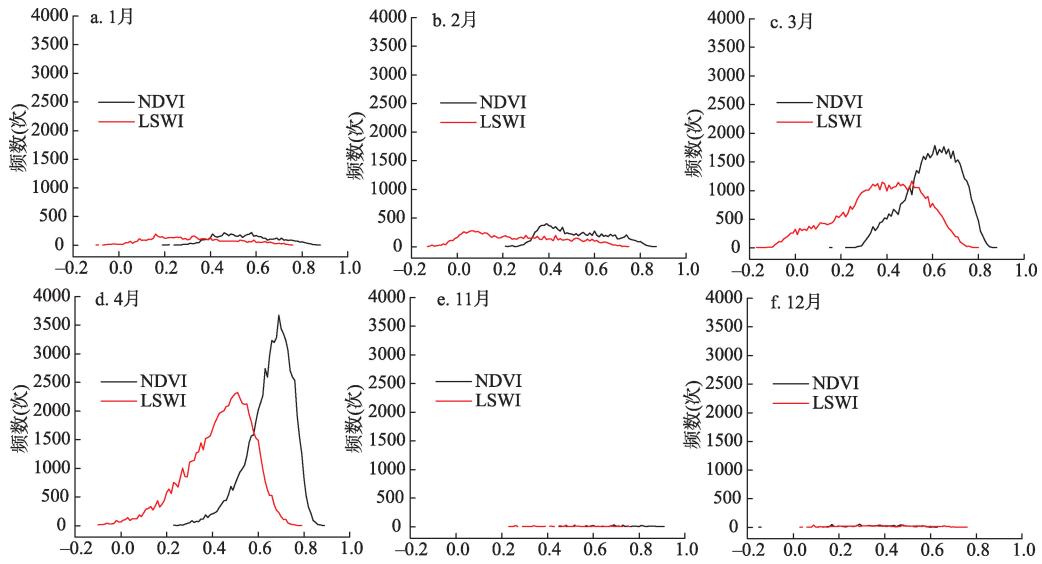


图7 2015年老挝旱季活跃火发生频数与NDVI、LSWI的关系

Fig. 7 Relationship between the frequency of active fires and MODIS NDVI and LSWI in Laos during the dry season of 2015

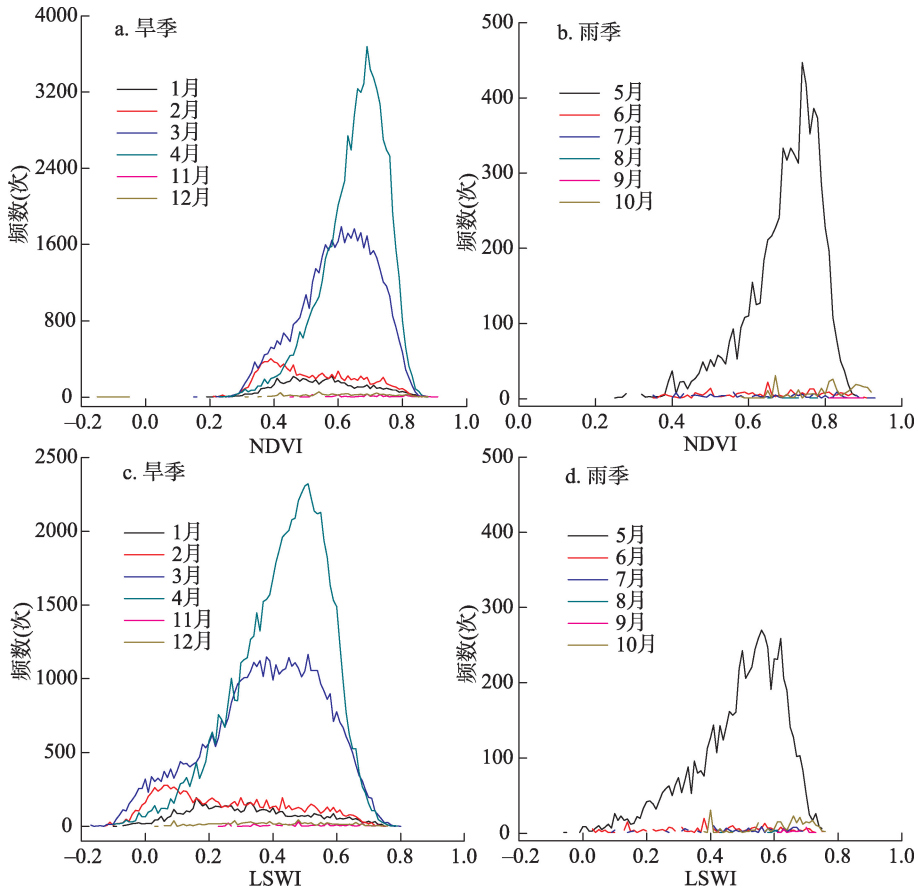


图8 2015年老挝旱季与雨季活跃火与其对应NDVI、LSWI的关系

Fig. 8 Relationship between the number of active fires and their corresponding NDVI and LSWI in Laos during the dry and rainy seasons in 2015

应像元的NDVI值在0~0.93之间都有分布,并集中分布在0.4~0.8之间,占比为92.05%,峰值出现在0.69,而0~0.2、0.2~0.4和0.8~1.0的占比分别是0.01%、5.86%和2.07%。活跃火发生地对像元的LSWI值在-0.2~0.8之间均有,活跃火集中分布在0.2~0.6之间,占比为75.70%,峰值LSWI约为0.51,而-0.2~0、0~0.2和0.6~0.8的占比仅为2.06%、12.88%和9.36%。由于4月活跃火数最多,因此以4月为特征月份进行活跃火点的NDVI、LSWI空间分析。从区域上看,上、中、下寮与整个老挝趋势一致,NDVI集中在0.4~0.8,LSWI集中在0.2~0.6。上、中寮的活跃火频数峰值对应的NDVI值均为0.69,下寮为0.76。上、中、下寮活跃火频数峰值对应的LSWI分别为是0.51、0.5、0.59,差异较小。

基于活跃火与MODIS NDVI/LSWI的统计结果,可推断老挝活跃火高度集中在3—4月的旱季。参照不同等级的植被覆盖度^[25]来看,老挝活跃火主要出现在中等覆盖度植被区(NDVI介于0.3~0.5)与中高覆盖度植被区(0.5~0.7),而对于极低覆盖度(0~0.1)、低覆盖度(0.1~0.3)以及高覆盖度(0.7~1.0)的植被区,活跃火现象很少。

4.4 2015厄尔尼诺年老挝活跃火土地覆被类型特征

从2015年老挝各区域及省份活跃火发生频数与土地覆被类型的关系(图9)可知,老挝2015年活跃火超过99%发生于森林、农田、草地和灌丛四类土地覆被类型,其占比依次为:77.69%、11.57%、6.60%和3.61%。值得注意的是,森林是活跃火发生的最主要

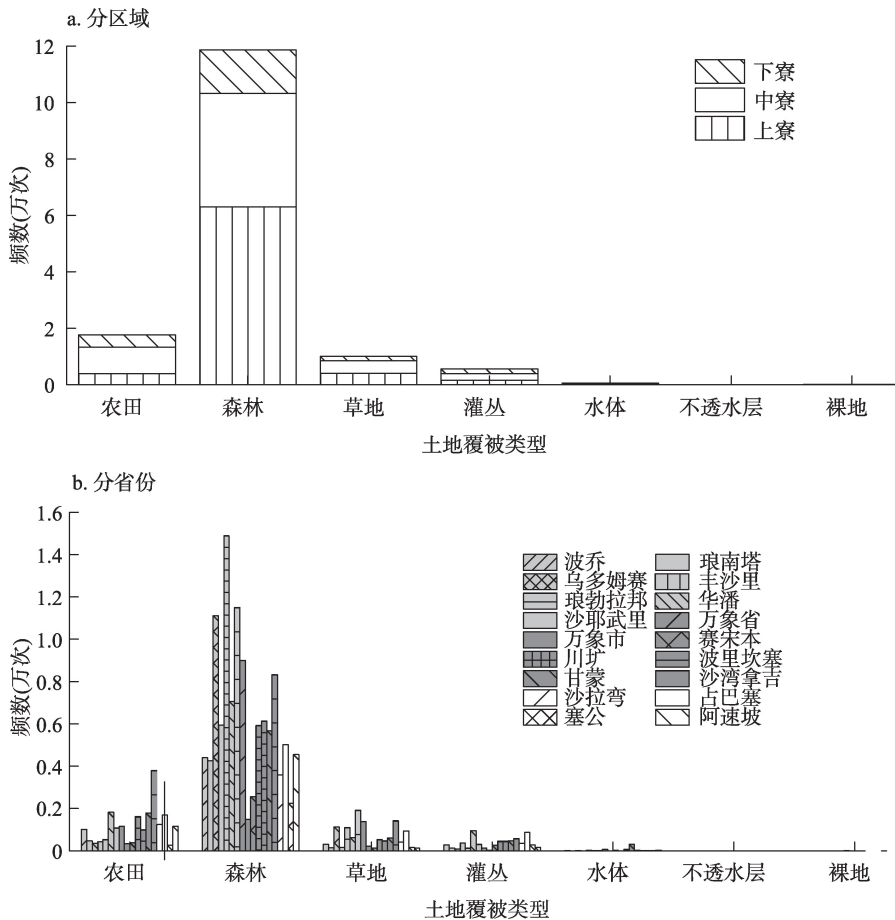


图9 2015年老挝各区域及省份活跃火发生频数与土地覆被类型的关系

Fig. 9 Relationship between occurrence frequency of active fires and land cover in various regions and provinces of Laos in 2015

覆被类型,而草地、灌丛多为刀耕火种农业休耕阶段的覆被类型。从区域上看,上寮森林发生活跃火6.31万次远高于中寮的4.02万次和下寮的1.54万次,占整个老挝森林活跃火的53.13%;森林活跃火在各区域土地覆被类型中都占据绝对位置,分别是上寮占到86.83%,中寮70.58%和下寮66.52%。农田发生活跃火最多的是中寮有0.95万次,比上寮(0.38万次)、下寮(0.43万次)农田活跃火发生频数之和还高,占整个老挝农田活跃火的53.79%;在区域内部,农田活跃火占比最高的是下寮为18.64%,其次是中寮的16.70%和上寮的5.29%。草地发生活跃火最多的中寮0.45万次,略高于上寮的0.40万次,下寮则最少为0.16万次;草地活跃火在区域内各土地覆被类型中占比差异不大,分别是占上寮的5.48%、中寮的7.82%和下寮的7.10%。灌丛发生活跃火最多的是中寮0.22万次,上寮和下寮不相上下,分别为0.16万次和0.17万次;灌丛活跃火在区域内各土地覆被类型中占比是最小的,分别是占上寮的2.22%、中寮的3.95%和下寮的7.15%。再进一步从省级单元来看,森林活跃火发生频数前三也是仅有3个超过万次的省份,分别是上寮的琅勃拉邦、沙耶武里和乌多姆赛,农田活跃火频数发生最高也是唯一超过2000次的是中寮的沙湾拿吉,草地发生活跃火最多的是上寮的沙耶武里1930次,灌丛发生活跃火最多的则是上寮的华潘950次。需要说明的是,尽管VIIRS分辨率较MODIS有明显提高,但对于小规模火情及阴燃现象难以有效监测出来。因此,老挝全国及不同区域活跃火现象应该会更加严重。

5 结论与讨论

基于老挝2012—2017年FIRMS VIIRS活跃火数据、ASTER GDEM、植被-水分指数(NDVI、LSWI)与土地覆被类型数据产品,运用GIS软件和统计分析方法对老挝活跃火发生的时空特征及影响因素进行了相关研究,结论如下:

(1) 2012—2017年老挝活跃火频次先增加后减少,峰值出现在2015年强厄尔尼诺。老挝活跃火主要集中在上寮和中寮,琅勃拉邦、沙耶武里与沙湾拿吉活跃火数居前三位,而万象市、塞公和赛宋本活跃火数位列末三位。

(2) 2012—2017年历年老挝活跃火频数与海拔、坡度的关系基本一致。2015年老挝活跃火集中在海拔1000 m以下(86.10%)、坡度小于30°(92.45%)的丘陵-低山。其中,上寮活跃火集中分布在500~1000 m、10~30°的山地斜陡坡。中寮和下寮活跃火集中在500 m以下、2~20°的丘陵缓斜坡。

(3) 老挝活跃火发生具有很强的旱/雨季季节性分布规律。活跃火绝大多数集中在旱季(94.75%),其中3月和4月最多(82.24%)。活跃火发生地集中分布在NDVI为0.4~0.8(92.05%)和LSWI为0.2~0.6(75.70%)的中高覆盖度植被区。

(4) 2015年老挝活跃火集中发生在森林(77.69%)、农田(11.57%)、草地(6.60%)和灌丛(3.61%)四种土地覆被类型,上中下寮各区域中活跃火发生频数最高的土地覆被类型都是森林,且整个老挝森林活跃火中发生最多的是上寮,而在农田、草地和灌丛中发生活跃火频数最高的是中寮。

(5) 老挝活跃火集中发生在丘陵-低山的中高植被覆盖森林缓斜坡区域,尤其是上寮地区,主要是由山民3—4月进行刀耕火种引起^[17-20]。

基于VIIRS V1 2012—2017年活跃火产品,本研究分析了老挝活跃火发生的时空分布规律,并从活跃火发生的地形(海拔与坡度)、植被-水气指数与土地覆被特征,对老挝活跃火成因进行了探讨,即主要由刀耕火种农业所引起。未来,在分析中南半岛、东南亚以及全球活跃火成因及其类型时,需要综合考虑土地利用/覆被类型、气象要素(如

温度与降水)等自然因素以及人为火源等因子,同时还应该加强区域活跃火对人口与居民点分布的可能影响范围与强度。

参考文献(References)

- [1] Lentile L B, Holden Z A, Smith A M S, et al. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 2006, 15(3): 319-345.
- [2] Choromanska U, Deluca T H. Microbial activity and nitrogen mineralization in forest mineral soils following heating: Evaluation of post-fire effects. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(2): 263-271.
- [3] Ahlgren I F, Ahlgren C E. Ecological effects of forest. *Botanical Review*, 1960, 26(4): 484-533.
- [4] Mchugh C W, Kolb T E. Ponderosa pine mortality following fire in northern Arizona. *International Journal of Wildland Fire*, 2003, 12(1): 7-22.
- [5] Dahm C N, Candelaria-Ley R I, Reale C S, et al. Extreme water quality degradation following a catastrophic forest fire. *Freshwater Biology*, 2015, 60(12): 2584-2599.
- [6] Le T H, Thanh Nguyen T N, Lasko K, et al. Vegetation fires and air pollution in Vietnam. *Environmental Pollution*, 2014, 195: 267-275.
- [7] Smith A M S, Wooster M J, Drake N A, et al. Fire in African savanna: Testing the impact of incomplete combustion on pyrogenic emissions estimates. *Ecological Applications*, 2005, 15(3): 1074-1082.
- [8] Ulevicius V, Byčėnkiėnė S, Remeikis V, et al. Characterization of pollution events in the East Baltic region affected by regional biomass fire emissions. *Atmospheric Research*, 2010, 98(2-4): 190-200.
- [9] Waigl C F, Stuefer M, Prakash A, et al. Detecting high and low-intensity fires in Alaska using VIIRS I-band data: An improved operational approach for high latitudes. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 199: 389-400.
- [10] Ellicott E, Vermote E, Giglio L, et al. Estimating biomass consumed from fire using MODIS FRE. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(13): 88-97.
- [11] Jordan N S, Ichoku C, Hoff R M. Estimating smoke emissions over the U.S southern great plains using MODIS fire radiative energy (FRE) measurements. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 2007-2022.
- [12] Henderson S, Burkholder B, Jackson P, et al. Use of MODIS products to simplify and evaluate a forest fire plume dispersion model for PM10 exposure assessment. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(36): 8524-8532.
- [13] Yaduvanshi A, Srivastava P K, Pandey A C. Integrating TRMM and MODIS satellite with socio-economic vulnerability for monitoring drought risk over a tropical region of India. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2015, 83-84: 14-27.
- [14] Vadrevu K, Lasko K. Intercomparison of MODIS AQUA and VIIRS I-band fires and emissions in an agricultural landscape: Implications for air pollution research. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 978-995.
- [15] Voulgarakis A, Field R D. Fire influences on atmospheric composition, air quality and climate. *Current Pollution Reports*, 2015, 1(2): 70-81.
- [16] Forsythe N, Kilsby C G, Fowler H J, et al. Assessment of runoff sensitivity in the upper indus basin to interannual climate variability and potential change using MODIS satellite data products. *Mountain Research and Development*, 2012, 32(1): 16-29.
- [17] Li P, Feng Z M, Xiao C W, et al. Detecting and mapping annual newly-burned plots (NBP) of swiddening using historical Landsat data in Montane Mainland Southeast Asia (MMSEA) during 1988-2016. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(9): 1307-1328.
- [18] Li P, Feng Z M. Extent and area of swidden in Montane Mainland Southeast Asia: estimation by multi-step thresholds with Landsat-8 OLI data. *Remote Sensing*, 2016, 8(1): 44-63.
- [19] Liao C H, Feng Z M, Li P, et al. Monitoring the spatio-temporal dynamics of swidden agriculture and fallow vegetation recovery using Landsat imagery in northern Laos. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(10): 1218-1234.
- [20] Li P, Feng Z M. Monitoring phenological stages of swiddening in northern Laos during the dry season. *International Society for Optics and Photonics*, 2014: 9260.
- [21] Müller D, Suess S, Hoffmann A A, et al. The value of satellite-based active fire data for monitoring, reporting and verification of REDD+ in the Lao PDR. *Human Ecology*, 2013, 41(1): 7-20.
- [22] Schroeder W, Oliva P, Giglio L, et al. The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 143: 85-96.
- [23] Tachikawa T, Hato M, Kaku M, et al. The characteristics of ASTER GDEM Version 2. In: *IEEE. IGARSS 2011 Symposium, Vancouver, Canada: IEEE*, 2011: 24-29.
- [24] 刘元保, 唐克丽. 国内外坡度分级和王东沟试验区的坡度组成. *水土保持通报*, 1987, (3): 59-65. [Liu Yuanbao, Tang

- Keli. On classification of slope steepness at home and abroad and its composition in wangdong experiment area of Changwu county, Shaanxi province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1987, (3): 59-65.]
- [25] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(3): 241-252.

Characteristics analyses of major physical geographic elements of Visible Infrared Imaging Radiometer (VIIRS) active fire in Laos

LIU Yiyuan¹, LI Peng^{2,3}, XIAO Chiwei^{2,3}, LIU Ying¹, RAO Didi^{2,3}

(1. College of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Using US NASA's Fire Information for Resource Management System (FIRMS) VIIRS V1 (or Visible Infrared Imaging Radiometer Version 1) active fire location vector data, ASTER GDEM (30 m, or Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS, 1 km) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Land Surface Water Index (LSWI), and Global Land Cover products (30 m), based on GIS, the dynamic changes in active fire events were quantitatively analyzed from provincial to national scales in Laos in 2012-2017. In addition, characteristics analyses of major physical geographic elements of VIIRS V1 active fires, including topography (elevation and slope), MODIS vegetation-moisture indices (NDVI and LSWI) and land cover types, were conducted in detail in the 2015 El Niño. The results showed that: (1) the number of active fire events in Laos increased first and then decreased in 2012-2017, with the peak in 2015. Active fires in Laos were mainly concentrated in the northern and central regions. Luang Prabang, Sayaburi and Savannakhet had the top number of active fires at the provincial level, while Vientiane City, Sekong and Xaisomboun in sequence ranked the last. (2) The relationship between the frequency of active fires in Laos and topographic factors (elevation and slope) in 2012-2017 was basically the same. Active fires primarily occurred in the hilly and low mountainous areas with elevations of less than 1000 m (86.10%) and slopes of less than 30° (92.45%). Among them, active fires in the northern region were concentrated in the mountainous areas with elevations of 500-1000 m and slopes of 10-30°, while others in the central and southern regions were concentrated in the hilly areas below 500 m and gentle slopes of 2°-20°. (3) Seasonally, the active fires in Laos mainly happened during the dry season (94.75%), with the most number in March and April (82.24%) and in the medium-high coverage vegetation area with NDVI of 0.4-0.8 (92.05%) and LSWI of 0.2-0.6 (75.70%). (4) Active fires were mostly distributed in the forests of Laos, especially in the northern part, while the counterparts in the central and southern parts mainly occurred in farmland, grassland and shrubland. (5) In summary, characteristics analyses of major physical geographic elements of VIIRS active fires can be used to determine its fire type, that is, active fires in Laos were mainly caused by swidden agriculture.

Keywords: active fire; topography; vegetation-moisture indices; land cover; ignition source-types; swidden agriculture