

引用格式:李静,宫阿都,陈艳玲,等.森林过火区植被遥感参数的变化与恢复特征分析[J].地球信息科学学报,2018,20(3):368-276. [Li J, Gong A D, Chen Y L, et al. Analysis on the Characteristics of Change and recovery of vegetation indices for forests in burned area[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(3):368-376.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.170464

森林过火区植被遥感参数的变化与恢复特征分析

李 静,宫阿都*,陈艳玲,王静梅,曾婷婷

1. 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; 2. 北京师范大学 环境遥感与数字城市北京市重点实验室,北京 100875; 3. 北京师范大学地理科学学部,北京 100875

Analysis on the Characteristics of Change and Recovery of Vegetation Indices for Forests in Burned Area

LI Jing, GONG Adu*, CHEN Yanling, WANG Jingmei, ZENG Tingting

1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, MOE, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. Beijing Key Laboratory of Environmental Remote Sensing and Digital City, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The application of remote sensing technology to study the response and recovery of forest vegetation in burned area can provide scientific basis for quick and accurate disaster prevention and mitigation. We focus on the forest fire occurred in Victoria, Australia from February 7, 2009 to March 14, 2009, which was the most serious forest fire in Victoria. In order to analyze the characteristics of change and recovery of forest vegetation indices in response to forest fire, we first used Landsat5 TM data of pre-fire and post-fire to extract the burned area of Victoria in Australia in 2009 and calculate the burn severity based on the Differential Normalized Burn Ratio (dNBR). We analyzed the effects of forest fire with different burn severity on vegetation using the anomaly value of Leaf Area Index (LAI) and the Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FAPAR) of Global Land Surface Satellite product(GLASS). Based on the time series data of LAI and FAPAR, we analyzed the vegetation recovery characteristics affected by forest fire with different burn severity. The results showed that LAI, FAPAR can reflect the damage effects of forest fire on vegetation and track the recovery process of vegetation well. The LAI and FAPAR values decreased rapidly after the forest fire. The greater the burn severity, the higher the decreasing amplitude. The maximum decreasing amplitude of LAI and FAPAR of high burn severity area were 1.2, 1.3 times higher than that of low burn severity area and medium burn severity area, respectively. The LAI and FAPAR values increased over a period of time after the forest fire and restored to normal levels in 2-3 years. The recovery time of LAI and FAPAR is related to fire scale, burn severity, the natural conditions of the burned area, the growth of the original vegetation and other factors. For example, one year after the forest fire in Victoria, the decreasing amplitude of LAI and FAPAR in small burned area was 4.8%

收稿日期 2017-10-03;修回日期:2018-01-20.

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFB0504102、2017YFC1502402);全球空间遥感信息报送和年度报告工作专项(1061302600001);国家自然科学基金项目(41671412);中央高校基本科研业务费专项项目。[**Foundation items:** National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0504102, 2017YFC1502402; Global Ecosystems and Environment Observation Analysis Report Program, No.1061302600001; National Natural Science Foundation of China, No.41671412; The Fundamental Research Funds for the Central Universities.]

作者简介 李 静(1994-),女,硕士生,主要从事灾害遥感监测研究。E-mail: 201521480065@mail.bnu.edu.cn

*通讯作者 宫阿都(1976-),男,副教授,主要从事灾害遥感监测、城市遥感研究。E-mail: gad@bnu.edu.cn

of the big burned area. The recovery time of LAI and FAPAR in high burn severity area and big burned area was 1 year or 2 years later than that of low burn severity area and small burned area. This study analyzed the characteristics of the change of the vegetation indices (LAI and FAPAR) of vegetation affected by the forest fire and summarized the recovery characteristics of damaged vegetation in Victoria, which can provide scientific basis for formulation of the measures of forest fire recovery.

Key words: forest fire; vegetation change; vegetation recovery; vegetation index; burn severity; GLASS

***Corresponding author:** GONG Adu, E-mail: gad@bnu.edu.cn

摘要 遥感技术可以快速、准确地监测森林火灾火烧迹地的植被遥感参数变化,分析植被对火灾的响应与恢复特征,为防灾减灾决策提供科学依据。本文首先基于森林火灾前后的 Landsat5 TM 数据,利用差分归一化燃烧指数(the Differential Normalized Burn Ratio, dNBR)来提取 2009 年澳大利亚维多利亚州火烧迹地的范围,计算过火区面积及火烧强度;其次基于时间序列的全球地表特征参量(Global Land Surface Satellite, GLASS)产品中的叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)、吸收光合有效辐射比例(Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation, FAPAR)数据,利用距平分析法对比不同火烧强度过火区植被与未过火区植被受森林火灾的影响状况与植被恢复特征。结果表明,森林火灾发生后, LAI、FAPAR 值迅速降低,火烧强度越大, LAI、FAPAR 下降程度越大,高火烧强度过火区的 LAI、FAPAR 最大降幅分别为中火烧强度、低火烧强度过火区的 1.2、1.3 倍;随时间推移, LAI、FAPAR 值逐渐上升,在 2-3 年内恢复至未过火区水平。 LAI、FAPAR 恢复至未过火区平均水平的时间与森林火灾规模、火烧强度密切相关;维多利亚州森林火灾过火区域中大过火斑块、高火烧强度林地的植被遥感参数恢复时间相比小过火斑块、低火烧强度林地滞后 1-2 年。植被遥感参数 LAI、FAPAR 能很好地反映过火区植被的受损状况及恢复过程。

关键词 森林火灾;植被变化;植被恢复;植被遥感参数;火烧强度;GLASS

1 引言

全世界每年发生火灾约 20 万次,过火面积 3.5~4.5 亿 hm^2 ^[1]。森林火灾会烧毁林木、危害野生动植物、污染空气,对国家经济发展、全球生态平衡、个人生命财产安全具有很大威胁^[2-3],但森林火灾一定程度上可以促进森林演替、维持森林生态系统平衡^[4-5]。及时、准确地监测植被受火灾影响的损害情况是制定灾后恢复措施的前提,同时,火烧迹地的植被恢复是森林生态结构、功能恢复的基础^[6]。卫星遥感数据可以提供大尺度、时间连续的信息,动态监测森林火灾的时空信息、演变过程^[7-10]以及受森林火灾影响的植被受损与恢复状况^[11-13],近年来应用广泛。

目前,基于森林火灾影响下的植被受损与恢复研究主要有 2 种方法:① 地面调查。解伏菊等^[14]研究发现海拔对大兴安岭北坡火烧迹地的恢复影响最大;蔡文华等^[15]研究发现植被立地条件、森林类型是影响火烧迹地植被演替的重要因素;王绪高等^[16]研究发现不同火烧强度的植被恢复状况不同,人工干预在不同火烧强度的林地植被恢复过程中效果不同。② 植被遥感参数法。苗庆林等^[17]利用 NDVI 分析不同火烧强度、不同类型的植被恢复状况。解伏菊等^[18]基于 NDVI 研究不同火烧强度下火烧迹地

森林景观格局恢复状况;李明泽等^[5]分析了森林火灾对大兴安岭植被指数变化的影响;Masek 等^[19]基于 NDVI 来评估森林扰动;肖向明等^[20]分别基于 LAI、NDVI、EVI、LAWI 等植被遥感参数研究森林火灾对植被的扰动以及火烧迹地的恢复。火灾后初期进行地面调查可以为制定恢复政策提供科学依据^[18,21],但无法进行长时间序列的监测及研究;植被遥感参数法不仅能快速分析火灾后初期植被的受损情况,且能长时间监测火烧迹地的植被演替情况。目前,基于植被遥感参数的植被受林火影响的研究多是基于单一传感器、单一算法获得的植被遥感参数产品,而不同产品的反演在时间和空间上不连续,为研究工作的可比性带来了很大的挑战;GLASS 全球陆表特征参量产品生成系统综合利用国内外卫星遥感数据源,生产了针对全球范围内,长时间序列的高精度植被遥感参数产品^[22]。目前,已有学者基于 GLASS LAI 产品监测中国东北大兴安岭地区森林扰动^[23],并证明了 LAI 数据监测亚马逊热带雨林地区植被状况的可行性^[24],以及 GLASS 反照率反映青藏高原地表状态的优越性^[25]。因而基于 GLASS 产品研究植被受林火影响状况分析可以更加准确地反映植被的变化,有利于不同研究的对比分析。

森林火灾在景观上往往造成不同程度的森林

冠层损失,森林冠层的损失和恢复通常采用叶面积指数(LAI)或其它能够反映冠层光合能力的植被指数进行表征^[20],吸收光合有效辐射比例(FAPAR)是表征植被生长状态的关键参数,影响着植被的生物、物理过程,如光合、呼吸、蒸腾、碳循环和降水截获量估算等^[26]。本文基于全球陆表参量特征产品(Global Land Surface Satellite, GLASS)中1982–2016年每8 d合成的LAI、FAPAR数据,分析森林火灾影响下的不同火烧强度的林地的变化与恢复过程,通过长时间监测过火区与未过火区植被的变化总结植被受森林火灾影响的规律,为防灾减灾行为与政策提供科学依据。

2 研究区概况

维多利亚州位于澳大利亚大陆东南端,总面积2376万 hm^2 ,30%为森林覆盖,受海洋影响较大,属于地中海气候。据澳大利亚气象局统计(http://www.bom.gov.au/climate/averages/tables/cw_086071.shtml),维多利亚州每年1、2月最炎热,平均最高温度为25.9 $^{\circ}\text{C}$,7、8月气温最低,平均最低温度为6.35 $^{\circ}\text{C}$,昼夜温差较小;降雨量自东南向西北逐渐减

少,年均降雨量为648.3 mm,其中冬春两季降雨较多。研究区位置及2008年地表覆盖类型分布状况如图1所示,本文研究的主要地表覆盖类型为林地。

自1851年以来,维多利亚州重大林火灾害发生次数占澳大利亚林火总次数的43%,属于林火多发区。2009年1月末到2月初,以墨尔本市为首的维多利亚州遭热浪袭击,气温高达40 $^{\circ}\text{C}$ 以上^[27],同时降水极度匮乏,1、2月降水量分别为0.8和3.0 mm。在高温与干旱的胁迫下,2009年2月7日至3月14日,澳大利亚维多利亚州爆发了历史上最大的森林火灾,过火面积约41.0万 hm^2 ,造成200多人死亡,大面积农田和森林被摧毁。

3 数据源与研究方法

3.1 研究数据与预处理

(1) 植被遥感参数数据

GLASS产品是基于10多颗卫星遥感和地面观测数据生成的全球陆表特征参量产品,具有时间序列长、时空分辨率高、质量高等特点。GLASS LAI反演算法集成时间序列的卫星观测数据(MODIS LAI产品, VEGETATION LAI产品, MODIS及

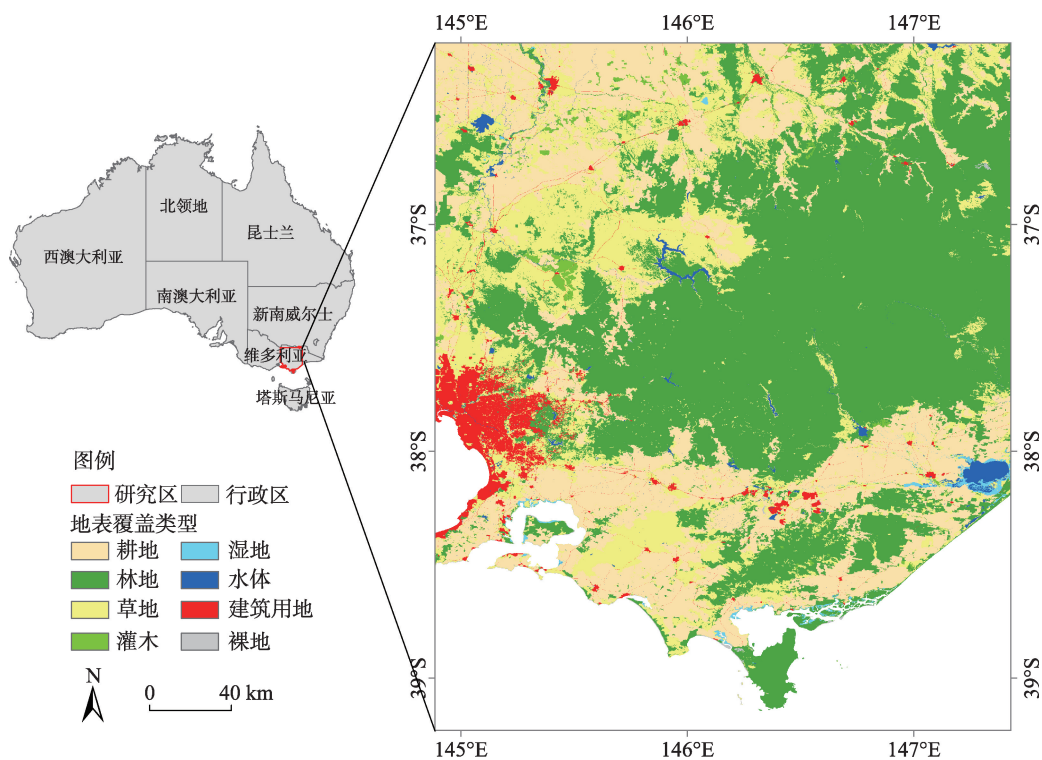


图1 研究区位置及地表覆盖

Fig. 1 Location and land cover of the study area

AVHRR地表反射率数据),利用广义回归神经网络(GRNNs)来估算叶面积指数。根据GLASS LAI产品针对不同植被类型的广泛验证结果证明, GLASS LAI产品空间上完整,时间上平滑连续,产品的精度优于MODIS和CYCLOPES LAI产品^[28]; GLASS FAPAR产品以GLASS LAI产品作为参数计算得到,与MODIS, GEOVI和SeaWiFS FAPAR产品相比, GLASS FAPAR产品与高空间分辨率的FAPAR具有更加一致的精度,时间上更连续,在50~60°N地带具有更稳定的值^[29]。本文依据GLASS产品的LAI、FAPAR数据来分析陆地植被受森林火灾影响的变化与恢复状况。数据来源于北京师范大学数据共享平台(<http://glass-product.bnu.edu.cn/>),数据范围覆盖维多利亚州的过火区及周边区域,时间分变率为8 d,每年监测共46次,空间分辨率为1 km×1 km,数据时间范围为2000–2016年。

植被遥感参数数据预处理过程主要包括:数据校正和裁剪。基于GLASS产品的缩放因子(LAI: 0.1, FAPAR: 0.004)进行数据有效值计算,并剔除无效值;其次根据研究区2008年提取得到的林地边界裁剪得到2000–2016年林地范围内的LAI及FAPAR时间序列数据。

(2) Landsat影像数据

本文利用Landsat 5 TM影像来提取森林火灾过火范围,并计算过火区火烧强度。数据来源于美国地质勘探局(USGS)(<http://earthexplorer.usgs.gov>),数据范围为85–87行, 91–93列,灾前数据采集时间为2008年2月14日至3月10日,灾后数据采集时间为2009年3月29日至4月21日。基于ENVI对Landsat数据进行预处理:辐射定标,大气校正及研究区裁剪。辐射定标参数见影像头文件,经计算得到各波段地表反射率数据。

(3) MODIS12Q1地表覆盖数据

本文使用2008年MODIS12Q1数据集产品中的Type1类型地表覆盖数据提取维多利亚州森林用地,研究林地植被受森林火灾影响的变化及恢复状况。数据来源于NASA航天局MODIS land下载中心(<http://modis-land.gsfc.nasa.gov>),空间分辨率为500 m。数据预处理包括投影转换、格式转换、裁剪。使用MRT(MODIS Reprojection Tool)工具将MODIS12Q1数据的投影方式由正弦曲线投影(ISIN)转换为Albert投影,转换数据格式为.tif,并裁剪得到研究区地表覆盖类型数据。

3.2 研究方法

(1) 火烧信息提取

利用维多利亚森林火灾前后年Landsat 5-TM影像,并依据4波段与7波段计算差分归一化燃烧比(dNBR)^[30–31],得到过火区范围及火烧强度信息,如式(1)所示。

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post}, \quad NBR = \frac{\rho_4 - \rho_7}{\rho_4 + \rho_7} \quad (1)$$

式中: NBR_{pre} 、 NBR_{post} 分别代表火前、火后影像的归一化燃烧比(NBR), NBR 值由TM近红外波段与中红外波段的反射率计算得到; ρ_4 为近红外波段反射率, ρ_7 为中红外波段反射率。设定 $dNBR$ 阈值为0.3来提取过火区域,当像元 $dNBR$ 值大于等于该阈值,则认为该像元为过火像元^[30–31]。在此基础上划分火烧强度,其中,低火烧强度 $dNBR$ 范围为0.3–0.5,中火烧强度 $dNBR$ 范围为0.5–0.8,高火烧强度 $dNBR$ 大于0.8。

(2) 距平分析法

基于研究区林地多年LAI、FAPAR的年际变化规律(图2)可知,维多利亚州山地地区与北半球季节相反,LAI在年内先上升到最大值,后降低,再缓慢上升,4月值最大;FAPAR变化规律相似,5月值最大。首先基于8天合成的LAI、FAPAR数据,利用均值合成法得到每月的LAI、FAPAR数据,再基于最大值合成法(MVC)生成的LAI、FAPAR年最大时序数据,MVC可以最大化消除由于云、雨、雪等对数据造成的噪声及误差影响^[32]。本文采用距平分析法分析植被受森林火灾影响的空间变化特征,LAI、FAPAR基于年最大值(分别为4月、5月的均值合成值)计算时间序列的距平值(式(2))。

$$\widehat{VI}_t' = VI_t' - \overline{VI} \quad (2)$$

式中: \widehat{VI}_t' 为第 t 年像元 i 的植被遥感参数LAI及FAPAR的距平值; VI_t' 为第 t 年像元 i 的植被遥感参

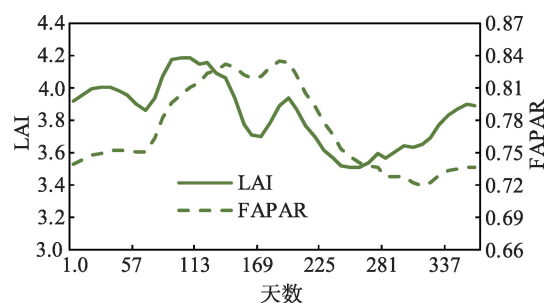


图2 未过火林地LAI、FAPAR年内变化规律

Fig. 2 Changes of LAI and FAPAR in unburned forest area

数值; \bar{V} 为从2000–2016年所有年份像元*i*的植被遥感参数均值。

4 结果与分析

基于上述方法得到2009年维多利亚州火烧强度分布情况,如图3所示。根据《森林防火条例》划分的森林火灾等级标准,森林燃烧面积在1000 ha以上的定义为特别重大森林火灾,图3中最小过火斑块面积为6036.9 ha,属于重大森林火灾,图中黑色框选区过火斑块平均燃烧面积为8.2万 ha,是剩余小过火斑块平均燃烧面积的4.67倍,属于典型的大过火斑块。典型过火斑块灾后遥感影像为2009年灾后植被生长期(2–4月)的Landsat5-TM影像,经5、4、3波段合成,绿色代表植被,暗红色斑块为火烧迹地,火烧斑块呈块状广泛分布于维多利亚州南部林地边界地区。在此基础上,得到森林火灾前后2008–2016年的GLASS产品植被遥感参数距平分布及其变化情况,以及2000–2016年不同火烧强度林地及未过火林地GLASS产品植被遥感参数的变化及其恢复情况。

4.1 森林火灾影响下的植被遥感参数空间变化分析

森林火灾前后研究区LAI、FAPAR距平值的空间变化情况如图4所示。距平值为正,代表该年

LAI、FAPAR值高于多年平均水平,距平值为负,代表该年LAI、FAPAR值低于多年平均水平,距平值的绝对值越大代表偏离程度越大。可以看出:① 2008年过火区LAI、FAPAR距平值大小与邻域地区一致,2009年过火区LAI、FAPAR距平值为负值且偏离程度最大(LAI: $-3.2 \sim -1$, FAPAR: $-0.7 \sim -0.2$),说明2009年植被相比多年平均状况明显受损;② 灾后每年过火范围内的LAI、FAPAR距平值都低于周围未过火地区的值,说明过火区植被相对未过火区受损;且过火区植被遥感参数相比未过火区的差值正在逐渐减小:2009年LAI距平值差值约为2.8,2011年差值约为1.6,2013年差值约为0.5, FAPAR也呈现相似规律,说明植被正在恢复。2013年1月澳大利亚全国平均气温达40.3℃,1月6日维多利亚州爆发森林火灾,导致该年东南部林地植被遥感参数出现负距平;③ 与低、中火烧强度地区相比,2011年高火烧强度地区距平值依旧保持在低值 $-0.7 \sim -0.1$ 之间,说明高火烧强度区植被受损严重,且恢复速度较慢,而低、中火烧强度区植被恢复较快,部分高火烧强度林地正距平值出现滞后于低火烧强度林地1–2年;④ 澳大利亚不同过火斑块植被恢复时间不一。每年墨尔本北部范围较大的典型过火斑块(图3中黑色框选区域)的植被遥感参数距平均值都小于其余小过火斑块距平均值,如2009年距平均值分别为 -1.52 、 -1.42 ,2010年距平均值分别为 -0.84 、 -0.04 ,说明大过火斑块植被受损更为严重,植被恢复速度更慢。

为了量化维多利亚州过火区LAI、FAPAR距平值随时间变化的规律,分别统计每年不同LAI、FAPAR距平等级值的比例(图5)。

由图5可以看出,与2008年相比,2009年植被遥感参数各等级比例发生突变,LAI、FAPAR距平负值像元(红色、橙色、黄色柱状图,颜色越深,负值程度越大,受损程度越大)比例分别由28.9%、23.9%增加至99.0%、98.3%,正值像元(绿色柱状图)比例分别由71.1%、76.1%缩减至1.0%、1.7%,说明森林火灾对植被的破坏作用明显;森林火灾后,正值像元比例缓慢增加,距平值整体有所提升,进一步表现了植被的恢复过程;灾后2年各等级植被遥感参数比例趋于稳定,基本恢复至2008年的水平。

4.2 森林火灾影响下的植被遥感参数时间变化分析

图6为典型过火斑块中不同火烧强度林地及周边未过火区植被遥感参数的变化情况。红色代表

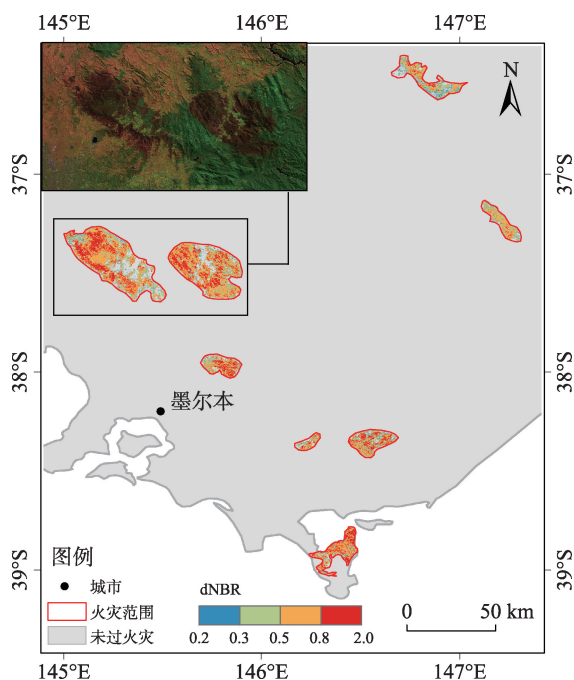


图3 过火区火烧强度

Fig. 3 The distribution of burn severity in burned area

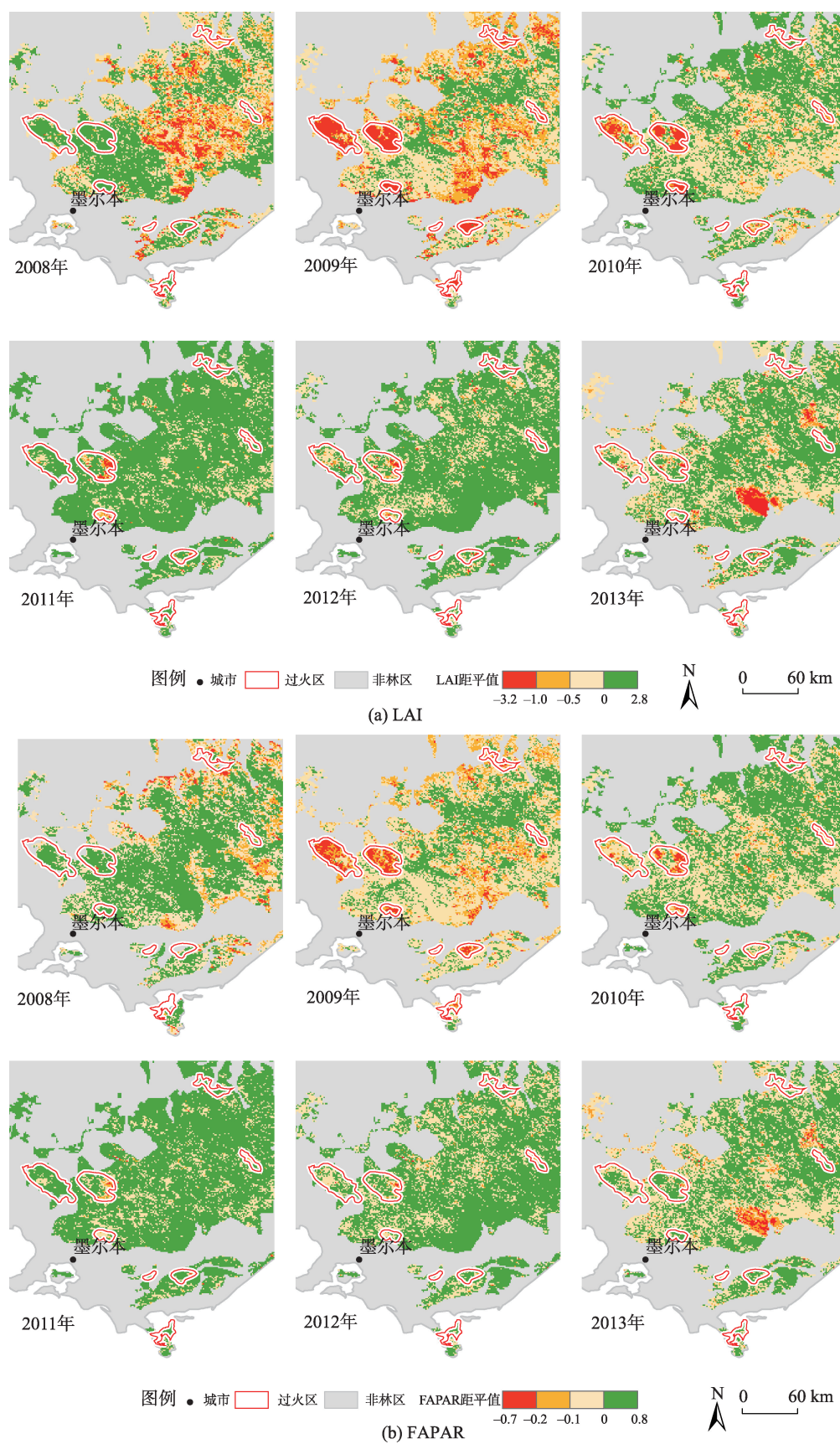


图4 研究区林地植被遥感参数距平值分布

Fig. 4 Spatial distribution of anomaly of remote sensing vegetation indices of the forest in the study area

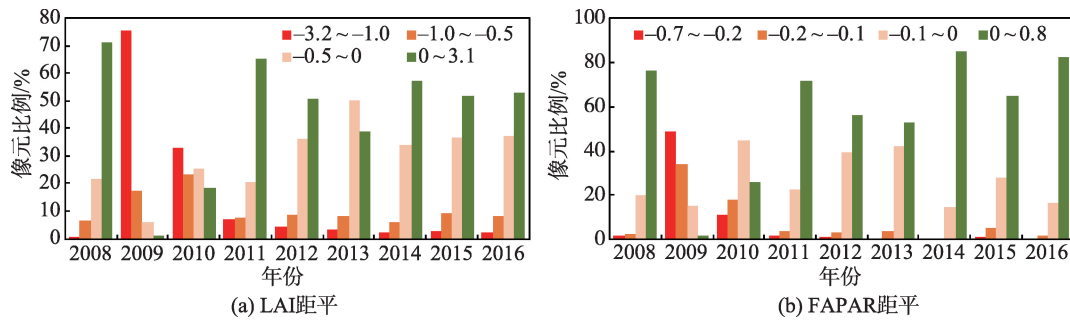


图5 过火区植被遥感参数距平值变化

Fig. 5 Changes of the anomaly of vegetation indices in the burned area

高火烧强度林地,橙色代表中火烧强度林地,黄色代表低火烧强度林地,绿色代表未过火区林地。可以发现,灾后过火区 LAI、FAPAR 迅速下降,后随季节影响下降到最小值,后缓慢恢复到未过火地区水平;且 LAI、FAPAR 下降幅度由大到小分别为高火烧强度林地、中火烧强度林地、低火烧强度林地,高火烧强度林地 LAI 最大降幅为未过火林地的 72%,中火烧强度林地 LAI 最大降幅为未过火林地的 68%,低火烧强度林地 LAI 最大降幅为未过火林地的 57%;维多利亚州不同火烧强度林地的 LAI、FAPAR 值约 2 年后恢复到未过火地区的 93%。

5 结论与讨论

本文基于长时间序列 GLASS 植被遥感参数产品的 LAI、FAPAR 数据分析 2009 年维多利亚州森林火灾后植被的变化与恢复状况及其影响因素,得到以下结论:① LAI、FAPAR 能一定程度上反映火灾后森林植被的受损状况与恢复过程。森林火灾后,过火区内 LAI、FAPAR 都呈现先下降、随季节变化

下降到最低值,后缓慢恢复的趋势。② 火烧强度越高,植被受损越严重,且恢复速度越慢。高火烧强度林地植被遥感参数的最大降幅约为低火烧强度林地最大降幅的 1.3 倍,中火烧强度林地最大降幅的 1.2 倍;部分高火烧强度林地植被遥感参数恢复时间滞后于低火烧强度林地 1-2 年。③ 过火范围,即过火斑块的大小也会影响植被受损程度以及植被恢复时间。过火斑块较大的火烧迹地植被遥感参数的降幅大于较小的过火斑块,如灾后一年小过火斑块植被遥感参数降幅为大过火斑块的 4.8%,正距平值出现时间较大过火斑块提前 1-2 年。总体来看,维多利亚州森林火灾后植被遥感参数恢复迅速,仅需 2 年恢复至未过火地区平均水平的 93%,这与维多利亚州过火范围小、分布离散、过火区原有植被生长茂盛,且 2011 年降水丰富有关。

本文分析总结了澳大利亚维多利亚州森林过火区植被遥感参数的变化与恢复特征,并分析了其影响因素,可以为森林火灾后恢复措施的制定等提供科学依据。但植被遥感参数的恢复不代表植被结构本身的恢复,植被结构的恢复需要更长时间,如

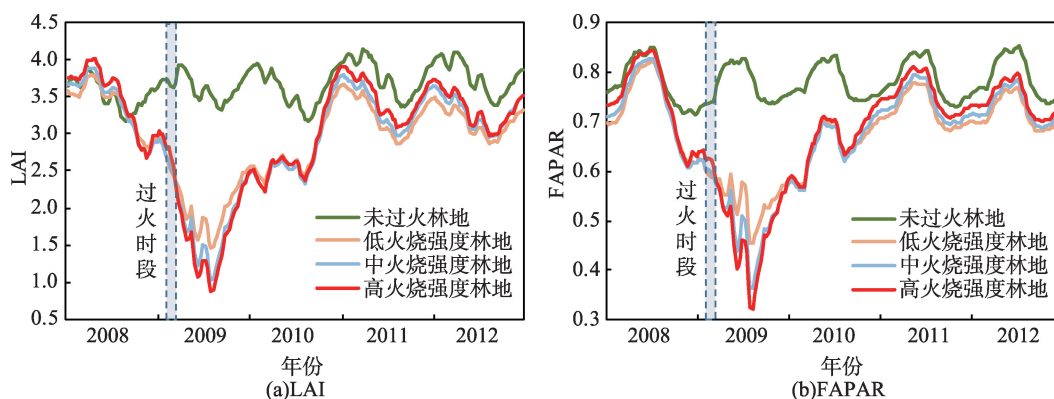


图6 研究区植被遥感参数变化

Fig. 6 Changes of vegetation indices in the study area

高火烧强度林地灾后草本植物、灌丛生长迅速^[16, 33], 对植被遥感参数的增长贡献较大。本文基于植被遥感参数的植被受森林火灾影响的变化与恢复特征分析具有一定的局限性, 不能准确反映森林结构及其功能的恢复过程, 今后应从植被物种类型演替方面, 结合地面调查数据, 解释植被遥感参数的变化机制。

致谢:感谢《全球生态环境遥感监测2017年度报告》专家组、编写组对论文的指导, 特别感谢刘纪远、牛铮、柳钦火、高志海、梁顺林、武建军、唐宏、蒋卫国、周红敏等老师在研究方法 & 结果分析上的意见和建议。

参考文献(References):

- [1] Shi P J, Kasperson R. World atlas of natural disaster Risk [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2015:309-323.
- [2] Houghton R A, Woodwell G M. Global climatic change [J]. Scientific American, 1989,4(4):36-44.
- [3] Mazzeo G, Marchese F, Filizzola C, et al. A multi-temporal robust satellite technique (RST) for forest fire detection[A]. 2007 International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images[C]. Beijing: 2007:1-6.
- [4] 胡海清. 林火生态与管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005. [Hu H Q. Ecology and management of forest fire [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005.]
- [5] 李明泽, 王雪, 高元科, 等. 大兴安岭植被指数年际变化及影响因子分析[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(5):1-10. [Li M Z, Wang X, Gao Y K, et al. Inter-annual variation in vegetation indices and analysis of affecting factors in Daxing'an mountains[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(5):1-10.]
- [6] 任海, 彭少麟, 陆宏芳. 退化生态系统恢复与恢复生态学[J]. 生态学报, 2004, 24(8):1756-1764. [Ren H, Peng S L, Lu H F. The restoration of degraded ecosystems and restoration ecology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(8):1756-1764.]
- [7] Ichoku C, Kahn R A, Chin M. Satellite contributions to the quantitative characterization of biomass burning for climate modeling[J]. Atmospheric Research, 2012, 111(1):1-28.
- [8] Jr D R C, Stocks B J, Levine J S, et al. Satellite analysis of the severe 1987 forest fires in northern China and southeastern Siberia[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1994, 99(D9):18627-18638.
- [9] García-Haro F J, Gilabert M A, Meliá J. Monitoring fire-affected areas using thematic mapper data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(4):533-549.
- [10] George C, Rowland C, Gerard F, et al. Retrospective mapping of burnt areas in Central Siberia using a modification of the normalised difference water index[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(3):346-359.
- [11] 王明玉, 任云卯, 李涛, 等. 火烧迹地更新与恢复研究进展[J]. 世界林业研究, 2008, 21(6):49-53. [Wang M Y, Ren Y M, Li T, et al. Advances in post-fire recovery research[J]. World Forestry Research, 2008, 21(6):49-53.]
- [12] Hernández Clemente R, Navarro Cerrillo R M, Gitas I Z. Monitoring post-fire regeneration in Mediterranean ecosystems by employing multitemporal satellite imagery. [J]. International Journal of Wildland Fire, 2009, 18(6):648-658.
- [13] Hicke G P, Kasichke E S, Nhf F, et al. Postfire response of north American boreal forest net primary productivity analyzed with satellite observations[J]. Global Change Biology, 2003, 9(8):1145-1157.
- [14] 解伏菊, 肖笃宁, 李秀珍. 大兴安岭北坡火烧迹地森林郁闭度恢复及其影响因子(英文)[J]. 生态学报, 2007, 27(3):879-888. [Xie F J, Xiao D N, Li X Z. Restoration of forest crown density and influencing factors in the burned area of northern Great Xing'an Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(3):879-888.]
- [15] 蔡文华, 杨健, 刘志华, 等. 黑龙江省大兴安岭林区火烧迹地森林更新及其影响因子[J]. 生态学报, 2012, 32(11):3303-3312. [Cai W H, Yang J, Liu Z H, et al. Controls of post-fire tree recruitment in Great Xing'an mountains in Heilongjiang Province. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11):3303-3312.]
- [16] 王绪高, 李秀珍, 孔繁花, 等. 大兴安岭北坡火烧迹地自然与人工干预下的植被恢复模式初探[J]. 生态学杂志, 2003, 22(5):30-34. [Wang X G, Li X Z, Kong F H, et al. Model of vegetation restoration under natural regeneration and human interference in the burned area of northern Daxinganling[J]. Chinese Journal of Ecology, 2003, 22(5):30-34.]
- [17] 苗庆林, 田晓瑞, 赵凤君. 大兴安岭不同植被火后 NDVI 恢复过程[J]. 林业科学, 2015, 51(2):90-98. [Miao Q L, Tian X R, Zhao F J. NDVI recovery process of post-fire vegetation in Daxing'anling[J]. Science Silvae Sinicae, 2015, 51(2):90-98.]
- [18] 解伏菊, 肖笃宁, 李秀珍, 等. 基于 NDVI 的不同火烧强度下大兴安岭林火迹地森林景观恢复[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4):368-372. [Xie F J, Xiao D N, Li X Z, et al. Assessment of forest landscape restoration based on NDVI under different burn intensity in the burned blank of Daxinganling mountains[J]. Chinese Journal of Ecology,

- 2005,24(4):368-372.]
- [19] Masek J G, Huang C, Wolfe R, et al. North American forest disturbance mapped from a decadal Landsat record[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008,112(6):2914-2926.
- [20] Xiang M, Biradar C, Wang A, et al. Recovery of vegetation canopy after severe fire in 2000 at the Black Hills National Forest, South Dakota, USA[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2011,2(2):106-116.
- [21] 关克志, 张大军. 大兴安岭森林火灾对植被影响分析[J]. *环境科学*, 1990,11(5):82-88. [Guan K Z, Zhang D J. Analysis of the impact of forest fire on vegetation in Daxinganling[J]. *Environmental Science*, 1990,11(5):82-88.]
- [22] 梁顺林. 全球陆表特征参量 (GLASS) 产品算法、验证与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014. [Liang S L. Global land surface satellite (GLASS) products: algorithms, validation and analysis[M]. Beijing: Higher Education Press, 2014.]
- [23] Wang J, Wang J D, Zhou H M. Detecting forest disturbance in northeast China from GLASS LAI time series data using a dynamic model[J]. *Remote Sensing*, 2017,12(9):1293.
- [24] 梁博毅, 刘素红, 瞿瑛, 等. 利用 GLASS LAI 数据分析 1982-2012 年亚马逊热带雨林变化[J]. *遥感学报*, 2016, 20(1):149-156. [Liang B Y, Liu S H, Qu Y, et al. Changes in the Amazon rainforest from 1982 to 2012 using GLASS LAI data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016,20 (1):149-156.]
- [25] 陈爱军, 胡慎慎, 卞林根, 等. 青藏高原 GLASS 地表反照率产品精度分析[J]. *气象学报*, 2015,73(6):1114-1120. [Chen A J, Hu S S, Bian L G, et al. An assessment on the accuracy of the GLASS albedo products over the Tibetan Plateau [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015,73(6):1114-1120.]
- [26] 苑惠丽. 森林 fAPAR 遥感估算研究——以大别山金寨区为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015. [Fan H L. Remote sensing estimation of forest fAPAR: A case study of Jinzhai District in Dabie Mountain[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015]
- [27] Bushfires in Australia[Z]. 2018-01-13.
- [28] Xiao Z, Liang S, Wang J, et al. Use of general regression neural networks for generating the GLASS Leaf Area Index product from time-series MODIS surface reflectance [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2013,52(1):209-223.
- [29] Xiao Z, Liang S, Sun R, et al. Estimating the fraction of absorbed photosynthetically active radiation from the MODIS data based GLASS leaf area index product[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015,171:105-117.
- [30] 李明泽, 康祥瑞, 范文义. 呼中林区火烧迹地遥感提取及林火烈度的空间分析[J]. *林业科学*, 2017,53(3):163-174. [Li M Z, Kang X R, Fan W Y. Burned area extraction in Huzhong forests based on remote sensing and the spatial analysis of the burn severity[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017,53(3):163-174.]
- [31] 余超, 陈良富, 李莘莘, 等. 基于多源卫星多光谱遥感数据的过火面积估算研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015,35(3): 739-745. [Yu C, Chen L F, Li S S, et al. Study on estimation of biomass burned areas from multispectral dataset detected by multiple-satellites[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015,35(3):739-745.]
- [32] 尹高飞. 基于多源数据的异质地表叶面积指数反演研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015. [Yin G F. Study on inversion of Leaf Area Index of heterogeneous surfaces based on multi-source data[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.]
- [33] Kovaleva N M. Postfire recovery of the ground cover in pine forests of the Lower Angara region[J]. *Contemporary Problems of Ecology*, 2014,7(3):338-344.