

基于 MODIS 遥感监测的东南亚地区植被动态*

林小惠^{1,2} 王军邦^{2**} 李贵才³ 齐述华¹

(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 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要 利用 2000—2008 年的 MODIS 陆地产品 MOD15A2 (fPAR) 与空间插值的气温和热带降雨观测卫星 (TRMM) 数据, 分析了东南亚地区植被时空动态, 主要分析了常绿阔叶林、灌丛草原、热带草丛和农田 4 种植被 fPAR 的年际变化、季节变化特征及其与气候的相关性。结果表明: (1) 2000—2008 年研究区植被的 fPAR 平均为 47.58%, 呈由西北向东南递增、沿海高于内陆的空间分布格局。(2) 研究区 87.34% 的区域植被 fPAR 变化不显著。(3) fPAR 能够反映植被时空动态, 对气候变化具有较好的响应。fPAR 的动态变化表明, 不同区域的各植被生长年际变化各有差异, 其所受气温和降水的影响程度也不同。

关键词 植被吸收光合有效辐射比; 植被; 趋势变化; 东南亚

中图分类号 Q948 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)4-0629-07

Vegetation spatiotemporal variation in Southeast Asia based on MODIS remote sensing monitoring. LIN Xiao-hui^{1,2}, WANG Jun-bang², LI Gui-cai³, QI Shu-hua¹ (¹ School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; ² Institute of Geographical Sciences and Nature Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ³ National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(4): 629-635.

Abstract: By using the 2000-2008 MODIS land information MOD15A2 (fPAR) and the TRMM data of air temperature and precipitation in tropics, this paper studied the vegetations spatiotemporal variation in Southeast Asia, with the focus on the inter-annual and seasonal variations of fPAR in evergreen broadleaf forests, woody savannas, grasslands, and croplands, and the correlations of these variations with climate conditions. In 2000-2008, the vegetations fPAR in Southeast Asia was averagely 47.58%, being increased from northwest to southeast and from coastal area to inland. In 87.34% of the study area, the fPAR had no significant variation. The fPAR could well reflect the vegetation seasonal variation in Southeast Asia, and had good responses to climate change. The variations of the fPAR suggested that the inter-annual variation of vegetation growth differed with regions, and the variation degree under the effects of air temperature and precipitation also varied.

Key words: fPAR; vegetation; trend change; Southeast Asia.

太阳辐射能是大气和地球表面物理过程及生物过程的主要能源, 是植物生长所需外部能量的唯一来源 (李刚等, 2009)。光合有效辐射 (photosynthetically active radiation, PAR) 是指能被绿色植物用来进行光合作用的那部分太阳辐射 (400 ~ 700 nm) 波段 (周晓东等, 2002)。其中能被植物冠层吸收的参

与光合生物量累积的光合有效辐射部分, 称为吸收性光合有效辐射 (absorbed photosynthetically active radiation, APAR) (吴炳方等, 2004)。光合有效辐射分量 (fraction of photosynthetically active radiation, fPAR) 为 APAR 在 PAR 中所占的比重, 即 $fPAR = aPAR/PAR$ (杨飞等, 2007), 表示植被冠层对能量的吸收能力 (Fensholt *et al.*, 2004), 是生态系统生产力模型、气候模型、作物估产模型等的重要参数 (杨飞等, 2008)。目前国内学者主要关注 fPAR 的遥感

* 中国气象局气候变化专项 (CCSF-09-09) 和国家重点基础研究发展计划项目 (2009CB421105) 资助。

** 通讯作者 E-mail: jbwang@igsrr.ac.cn

收稿日期: 2010-09-15 接受日期: 2010-12-25

反演(李刚等,2009)及 fPAR 与光谱植被指数之间的关系研究(杨飞等,2008),以期实现 fPAR 大尺度的遥感估算,减少生产力模型和碳收支估算的不确定性。

森林作为陆地生态系统的主体,因其分布范围大,以及巨大的碳储量和碳固持而备受气候变化研究的关注(王兴昌等,2008),其中热带森林的碳储量占全球植被总碳库的 37% (吕晓涛等,2007),在保护生物多样性、维持全球碳氧平衡、调节气候等方面具有重要作用(臧润国和丁易,2008),但热带原始森林是“碳汇”还是“碳源”,以及其对未来气候变化的响应等尚无定论(吕晓涛等,2007)。由于农业扩张,砍伐,生境破碎化和城市化使东南亚成为森林砍伐率最高的地区之一,这将导致物种多样性的下降与灭绝(Sodhi *et al.*, 2010)。温室效应和气候变化通过影响植物生长发育过程和水分循环过程,对植被生产力的形成产生重大影响(赵俊芳等,2008)。监测长时间系列植被活动的年际变化特征有助于我们更好地理解模拟陆地生态系统的动态变化特征,揭示全球气候变化的规律(马明国等,2006)。

遥感数据在时空上的连续性决定了它是植被-气候关系研究中非常有效的数据源(渠翠平等,2009)。归一化植被指数(NDVI)是目前应用最广的一种,但许多研究也表明,NDVI 也受到定标和仪器特性、云和云影、大气、双向反射率、土壤及叶冠背景、高生物量区饱和等因素影响,使其应用受到限制(郭锐,2003)。尽管基于 NDVI 的 fPAR 也存在类似的问题,但作为生态系统生产力模型的重要输入参量,以 fPAR 为植被动态监测指标,一方面可评价 fPAR 对该地区植被动态的反映能力,另一方面,分析 fPAR 所反映热带植被的生长动态及其对气候变化的响应,这 2 点也正是本文的主要研究目标。这对于基于遥感的植被生产力监测,认识东南亚地区森林植被生长的时空格局具有重要意义。

1 研究区概况与数据来源

东南亚地区位于 36°N — 11°S , 68°E — 142°E , 包括马来群岛、中南半岛和印度半岛。该区域除印度西北部是热带沙漠气候外,其余地区主要是热带雨林和热带季风气候,中南半岛和印度半岛属于热带季风气候,终年高温,季相明显,全年可以分为 3 个

季节:旱季、雨季和热季。在干燥的东北季风控制下,冬季降水稀少,在西南季风来临之前为热季,是一年中最热的季节,在从海洋吹来的西南季风控制之下为雨季。本文以赤道为界将其分为北马来群岛和南马来群岛。马来群岛跨越赤道属于热带气候,主要是热带雨林气候,全年高温多雨。为了更好地描述植被生长动态与气候因子的关系,本文将研究区分成北马来群岛、南马来群岛、印度半岛和中南半岛 4 个分区,并以 a、b、c、d 标记(图 1)。利用 2008 年土地利用与土地覆盖数据产品(MOD12Q1)提取的植被覆盖类型,常绿阔叶林(evergreen broadleaf forest, EBF)、灌丛草原(woody savannas)、热带草丛(grasslands)和农田(croplands)是该区的典型植被类型,覆盖面积广,因此主要针对这 4 种植被进行深入分析。

本文所采用的遥感数据为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的 8 d 合成 MODIS LAI/fPAR 产品(MOD15A2),重采样为 $8\text{ km}\times 8\text{ km}$ 的空间分辨率,时间序列是从 2000 年第 57 天到 2008 年第 361 天;气象数据来自国家气象数据中心(national climatic data center, NCDC, <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/g sod>),选取了 2000—2008 年该区域气象站点的气温数据,并利用 ANUSPLIN 软件进行空间插值(Hutchinson, 2001);降水数据来自气候降水数据中心(climate rainfall data center, CRDC)的热带降雨观测卫星(tropical rainfall measuring mission, TRMM)的 3B42 标准降水产品(http://rain.atmos.colostate.edu/CRDC/frame_prod.html)时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。为了与 fPAR 相匹配,气象数据也处理为每 8 d, $8\text{ km}\times 8\text{ km}$ 的时空分辨率。

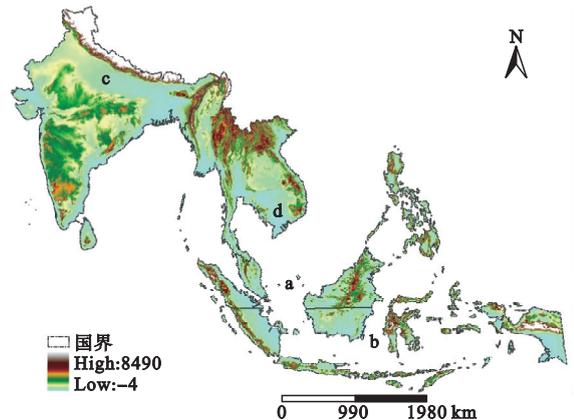


图 1 研究区分区及数字高程模型(DEM)数据示意图
Fig. 1 Division of study area and its DEM spatial pattern

2 研究方法

2.1 fPAR 年际变化趋势

利用一元线性回归计算出 2000—2008 年该区域植被 fPAR 的年际变化趋势斜率,计算公式:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times x_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n x_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式(1)中, $i \in [1, n]$, i 为年份, x_i 为第 i 年的 fPAR。运用相关系数检验变化趋势显著性,样本数为 9,显著性水平为 95% 和 99% 的相关系数临界值分别为 0.666, 0.798。运用变异系数(CV, 标准偏差与平均值之比)分析 2000—2008 年 fPAR 年际波动的稳定性。

2.2 气候对植被影响分析

运用一次二元线性回归方程分析 2000—2008 年气温和降水对植被的影响,即假定 fPAR 与降水和气温间关系为:

$$fPAR = \beta_1 \times \text{降水} + \beta_2 \times \text{气温} \quad (2)$$

式(2)中, β_1 、 β_2 为标准化回归系数,它消除了量纲影响从而可对比各自对植被的贡献。

3 结果与分析

3.1 东南亚地区气候及植被分布特征

研究区域主要是热带雨林气候及热带季风气候,热带雨林气候的特征是全年高温多雨,而热带季风气候是终年高温,季相明显。南北马来群岛年气温波动变化较小,年均温同为 25.43℃;受季风和赤道海洋气候的影响,雨量较多,北马来群岛旱雨季分明,10 月至次年 4 月为雨季,5—9 月为旱季。南马来群岛常年盛行东南季风,雨量变化较小(图 3)。印度半岛和中南半岛大部分地区属热带季风气候,全年温差较大,年均温分别为 25.59℃、23.84℃,年降水量较少,干湿季分明(图 3)。印度半岛 1—6 月是雨季,7—10 月为旱季,中南半岛的雨季为 2—7 月,旱季是 8 月至次年 1 月。

根据 2008 年土地利用/土地覆盖数据产品,研究区以森林和农田为主要植被,其次是草原植被(图 2)。其中森林面积占研究区总面积的 37.45%,主要分布于印度西高止山的西南部及斯里兰卡的北部及南部,喜马拉雅山脉的东北部,那加山脉及库孟山脉,泰国与缅甸交界山区,老挝的北部及

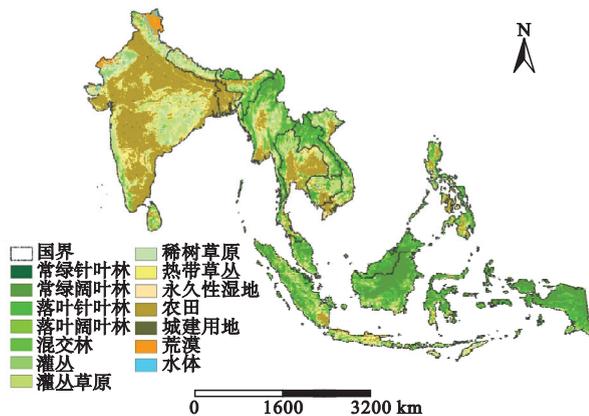


图 2 2008 年研究区植被类型数据示意图

Fig. 2 Vegetation type spatial pattern in 2008

长山脉狭长地带,豆蔻山脉,马来西亚的中部高原,菲律宾北部山地及东部海岸和印度尼西亚。其中常绿阔叶林占研究区总面积的 33.29%,混交林为 1.79%,落叶阔叶林为 1.53%,常绿针叶林和落叶针叶林所占面积比不及 1%。草原占研究区总面积的 14.04%,主要分布于印度北部的喜马拉雅山麓、西高止山的西部海岸、卡奇沼泽地、塔尔沙漠、印度中东部、缅甸掸邦高原、越南北部及柬埔寨与越南的东部边界和小巽他群岛,其中灌丛草原占研究区总面积的 13.55%,而稀树草原为 0.49%。热带草丛占研究区总面积的 1.68%,其分布的范围较零星,主要分布于印度中东部及北部的喜马拉雅山麓。灌丛占研究区总面积的 2.84%,主要分布于印度大沙漠的中部,喜马拉雅山麓和苏门答腊岛中部,部分分布于缅甸中部。农田占研究区总面积的 20.56%,主要分布于恒河平原、印度河平原、德干高原、缅甸南北向的广大冲积平原、泰国中部的湄南河平原、湄公河三角洲、红河三角洲及马来群岛沿海平原。

3.2 东南亚地区 fPAR 的时空变化趋势

2000—2008 年研究区植被的平均 fPAR 为 47.58%,呈西北向东南递增、沿海高于内陆的空间分布格局(图 2 和图 4)。其中常绿阔叶林最高(72.5%)、灌丛草原次之(48.59%)、农田(33.68%)和热带草丛(27.22%)较低。

研究区 2000—2008 年的 fPAR 变异系数表现为,呈由西北向东南递减,沿海低于内陆地区的空间分布格局(图 4b)。fPAR 低值的印度半岛和中南半岛的内陆地区,其年际波动较大,而 fPAR 高值的马来群岛及中南半岛沿海地区,其年际波动较小。从

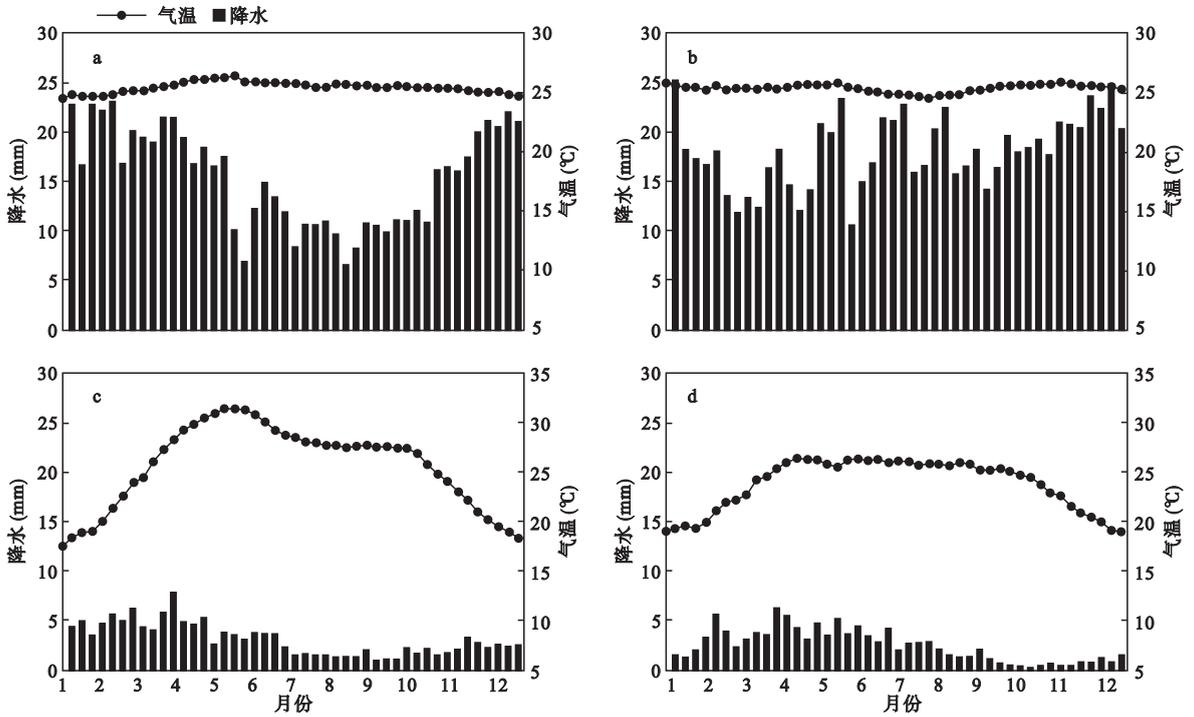


图3 2000–2008年北马来群岛(a),南马来群岛(b),印度半岛(c)和中南半岛(d)的每8d气温和降水多年平均季节变化
Fig.3 Seasonal change of multiyear 8-day mean temperature and precipitation in North Malaysia (a), South Malaysia (b), the India Peninsula (c) and Indo-China Peninsula (d)

植被类型上看,热带草丛的年际波动最大(变异系数为0.23),其次是农田(0.20)和灌丛草原(0.16),常绿阔叶林最小(0.13)。表明植被生长的稳定性常绿阔叶林最好,热带草丛最差,其次是灌丛草原和农田。

fPAR的年际变化趋势直线斜率分析显示,研究区87.34%的区域植被fPAR变化不显著(图4)。印度河平原中西部和恒河平原东部fPAR呈增加趋势,显著性水平高于99%和95%的面积分别占总面积的3.58%和5.44%;马来群岛岛屿中部和中南半岛中部及南部表现出降低趋势,显著性水平高于99%和95%的面积分别占总面积的1.04%和2.6%。

3.3 fPAR与气温和降水的相关分析

MODIS陆面产品fPAR能较好地反应植被动态变化及其对气温和降水的响应。不同区域的各植被fPAR年际变化各有差异,其所受气温和降水的影响程度也不同。中南半岛、南马来群岛和印度半岛植被fPAR季节变化趋势一致,北马来群岛植被fPAR的季节波动幅度较小(图5)。研究区灌丛草原、热带草丛和农田fPAR季节变化呈单峰式分布。研究区除南马来群岛的农田外,气温和降水对植被fPAR

的变化均有显著的影响。从表1可以看出,南北马来群岛的常绿阔叶林fPAR主要受气温的影响;北马来群岛、印度半岛和中南半岛除常绿阔叶林,其他植被fPAR均与降水成负相关,气温对其影响要高于降水。印度半岛及中南半岛的常绿阔叶林、南马

表1 4种植被fPAR与气温和降水的线性回归结果
Table 1 Linear regression result of the four types of vegetation fPAR with temperature and precipitation

地区		常绿阔叶林	灌丛草原	热带草丛	农田
北马来群岛	β_1	0.173	-0.661	-0.901	-0.767
	β_2	0.98	-0.103	-0.05	-0.647
	R^2	0.809	0.375	0.766	0.473
	Sig.	0.000	0.000	0.000	0.000
南马来群岛	β_1	-0.078	0.876	0.761	0.000
	β_2	0.296	0.227	0.153	0.028
	R^2	0.177	-0.55	0.314	0.000
	Sig.	0.092	0.18	0.044	0.379
印度半岛	β_1	0.435	-0.636	-0.777	-0.551
	β_2	-0.474	-0.252	0.282	-0.376
	R^2	0.445	0.444	0.715	0.414
	Sig.	0.000	0.000	0.000	0.000
中南半岛	β_1	0.253	-0.875	-0.591	-0.769
	β_2	-0.479	0.24	0.751	0.036
	R^2	0.205	0.669	0.588	0.572
	Sig.	0.007	0.000	0.000	0.000

线性回归方程为 $fPAR = \beta_1 \times \text{降水} + \beta_2 \times \text{气温}$ 。

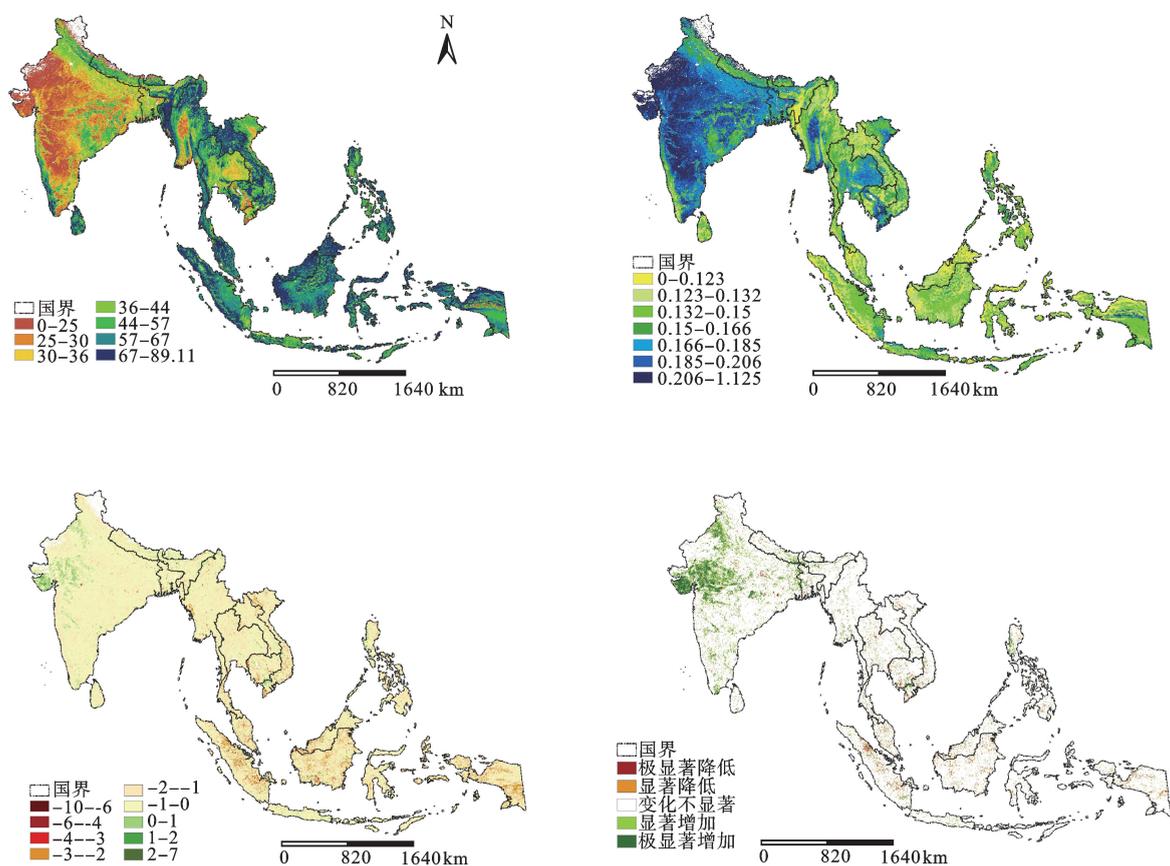


图4 2000—2008年研究区平均fPAR (a), fPAR变异系数(b), 年际变化趋势(c)和变化趋势显著性(d)的空间分布示意图
Fig.4 Spatial pattern of the mean (a), coefficient of variation (b), inter-annual trend (c) and the significant level of inter-annual trend (d) of fPAR during 2000 to 2008

来群岛的灌丛草原和热带草从 fPAR 主要受降水的影响,而与气温和降水的相关性不明显。

常绿阔叶林 fPAR 从 10 月至次年 4 月季节波动变化较平缓,从 4 月份开始,植被 fPAR 呈降低趋势,于 7 月达到最低值,中南半岛与印度半岛的最低值分别为 64.9% 和 59.36%。南北马来群岛常绿阔叶林 fPAR 与气温和降水显著相关。南马来群岛处于南半球,7 月为冬季,常绿阔叶林 fPAR 受低温影响,达到最低值 60.2%。北马来群岛的常绿阔叶林 fPAR 主要受气温的影响,与气温的年际波动相似,全年的波动较小,于 5 月达到波峰(79.93%),12 月达到波谷(66.3%)(图 5)。

灌丛草原和农田 fPAR 季节变化趋势较相似,呈单峰式分布,于 9 月和 10 月达到波峰(图 5)。除南马来群岛的农田外,气温和降水对多树草原及农田 fPAR 的变化有显著的影响,但相关性不明显(表 1)。灌丛草原 fPAR 从 10 月开始呈降低趋势,次年 3 月中达到最低值,3 月中至 10 月呈波动上升

变化趋势,于 10 月初达到最高值,北马来群岛、中南半岛、印度半岛和南马来群岛的峰值分别为 57.64%、63.98%、64.44% 和 64.46%。农田 fPAR 从 12 月至次年 6 月缓慢下降,7—10 月呈逐步上升趋势,中南半岛、印度半岛和南马来群岛于 10 月达到波峰,最高值分别为 47.93%、48.19% 和 49.12%;北马来群岛于 9 月达到波峰(48.48%)。

热带草从 fPAR 季节变化呈单峰式分布,气温和降水对热带草从 fPAR 的变化有显著的影响,其中北马来群岛和印度半岛相关性较好,与降水有着显著负相关(图 5c 和表 1)。热带草从 fPAR 从 9 月至次年 4 月缓慢下降,4—7 月逐步上升,7—10 月变化平稳,波峰依次为 31.69%、33.75%、32.1% 和 33.8%。

以上分析表明,以 fPAR 分析东南亚地区植被的生长状况及其与气候的相关性时,fPAR 能够很好地反映热带雨林季雨林的节季节变化,也能反映草地的节季节变化,这与以往研究结论较为一致(李刚,2009)。

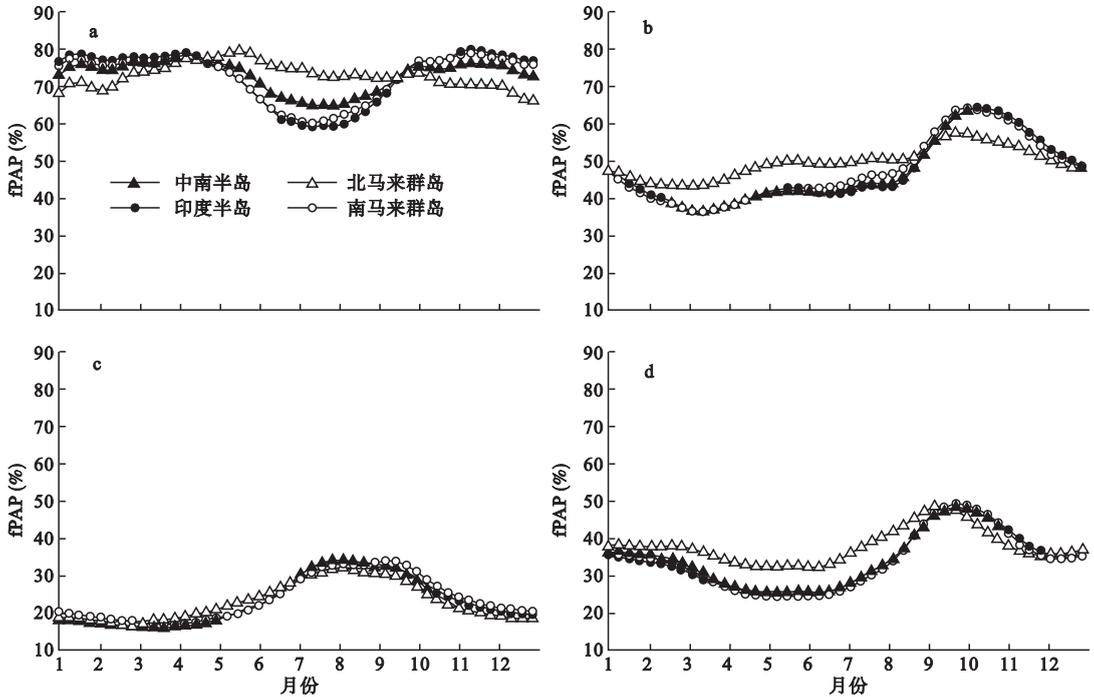


图5 2000—2008年研究区常绿阔叶林(a), 灌丛草原(b), 热带草丛(c)和农田(d)的每8天fPAR多年均值
Fig.5 Multiyear 8-day mean of fPAR of evergreen broadleaf forest (a), woody savannas (b), grasslands (c) and croplands (d)

4 结论

2000—2008年研究区植被的fPAR平均为47.58%,呈西北向东南递增、沿海高于内陆的空间分布格局,常绿阔叶林(72.5%)>灌丛草原(48.59%)>农田(33.68%)>热带草丛(27.22%)。fPAR变异系数表现出与平均fPAR一样的空间格局,热带草丛(0.23)>农田(0.20)>灌丛草原(0.16)>常绿阔叶林(0.13),表明植被生长的稳定性常绿阔叶林最好,热带草丛最差,其次是灌丛草原和农田。

fPAR的年际变化趋势直线斜率分析显示,研究区87.34%的区域植被fPAR变化不显著。印度河平原中西部和恒河平原东部fPAR呈增加趋势,显著性水平高于99%和95%的面积分别占总面积的3.58%和5.44%;马来群岛岛屿中部和中南半岛中部及南部表现出降低趋势,显著性水平高于99%和95%的面积分别占总面积的1.04%和2.6%。

不同区域的各植被fPAR年际变化各有差异,其所受气温和降水的影响程度也不同。中南半岛、南马来群岛和印度半岛植被fPAR季节变化趋势一致,北马来群岛植被fPAR的季节波动幅度较小;灌丛草原、热带草丛和农田fPAR季节变化呈单峰式

分布。研究区除南马来群岛的农田外,气温和降水对植被fPAR的变化均有显著的影响,其中,南北马来群岛的常绿阔叶林、北马来群岛和印度半岛的热带草丛及中南半岛的灌丛草原fPAR与气温和降水成显著相关。

遥感以其大面积、快速、动态的优势在宏观生态研究中得到广泛应用,通过植被反射光谱特征反演主要地面生物物理参数,如土地利用变化、地面反照度、叶面积指数、PAR、fPAR、净第一性生产力及其他冠层结构参数等,可直接作为陆地生态系统碳循环模型的驱动变量或参量,可直接利用植被指数或高光谱分辨率遥感数据获取陆地生态系统植被碳库,植被与大气CO₂交换、陆地生物圈的碳流季节性变化特征等信息(王军邦等,2004,陈新芳等,2005)。随着卫星遥感技术的快速发展,特别是国产卫星,如风云-3和环境小卫星(HJ-1A和HJ-1B)正在开发一系列陆表植被产品,从而有可能将更多的高质量数据引入植被监测及碳循环研究。全球气候变化研究已不局限于本土陆地生态系统过程,而将目光转向国外,特别是周边国家的生态系统状况,且尤为重要。因此,本文以MODIS卫星产品,对东南亚地区植被动态进行分析,对于积累方法、数据及认识,具有重要的参考价值。

参考文献

- 陈新芳, 安树青, 陈镜明, 等. 2005. 森林生态系统生物物理参数遥感反演研究进展. *生态学杂志*, **24**(9): 1074-1079.
- 郭 钺. 2003. 植被指数及其研究进展. *干旱气象*, **21**(4): 71-75.
- 李 刚. 2009. 呼伦贝尔温带草地 fPAR-LAI 遥感估算方法研究(博士学位论文). 北京: 中国农业科学院.
- 李 刚, 王道龙, 范闻捷, 等. 2009. 羊草草甸草原 fPAR 时间变化规律分析. *遥感信息*, (1): 10-15.
- 吕晓涛, 唐建维, 何有才, 等. 2007. 西双版纳热带季节雨林的生物量及其分配特征. *植物生态学报*, **31**(1): 11-22.
- 马民国, 王 建, 王雪梅. 2006. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展. *遥感学报*, **10**(3): 421-431.
- 渠翠平, 关德新, 王安志, 等. 2009. 科尔沁草甸草地归一化植被指数与气象因子的关系. *应用生态学报*, **20**(1): 58-64.
- 王军邦, 牛 铮, 胡秉民, 等. 2004. 定量遥感在生态学研究中的基础应用. *生态学杂志*, **23**(2): 152-157.
- 王兴昌, 王传宽, 于贵瑞. 2008. 基于全球尺度相关的森林碳交换的时空格局. *中国科学: D 辑*, **38**(9): 1092-1102.
- 吴炳方, 曾 源, 黄进良. 2004. 遥感提取植物生理参数 LAI/fPAR 的研究进展与应用. *地球科学进展*, **19**(4): 585-590.
- 杨 飞, 张 柏, 李凤秀, 等. 2007. 大豆和玉米冠层光合有效辐射各分量日变化. *生态学杂志*, **26**(8): 1153-1158.
- 杨 飞, 张 柏, 宋开山, 等. 2008. 玉米光合有效辐射分量高光谱估算的初步研究. *中国农业科学*, **41**(7): 1947-1954.
- 杨 飞, 张 柏, 宋开山, 等. 2008. 玉米和大豆光合有效辐射吸收比例与植被指数和叶面积指数的关系. *作物学报*, **34**(11): 2046-2052.
- 臧润国, 丁 易. 2008. 热带森林植被生态恢复研究进展. *生态学报*, **28**(12): 6292-6304.
- 赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 2008. 东北森林净第一性生产力与碳收支对气候变化的响应. *生态学报*, **28**(1): 92-102.
- 周晓东, 朱启疆, 王锦地, 等. 2002. 夏玉米冠层内 PAR 截获及 fPAR 与 LAI 的关系. *自然资源学报*, **17**(1): 110-116.
- Fensholt R, Sandholt I, Rasmussen MS. 2004. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, **91**: 490-507.
- Hutchinson MF. 2001. Anusplin version 4. 2 user guide. Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University, Canberra, Australia.
- Sodhi NS, Koh LP, Clements R, *et al.* 2010. Conserving Southeast Asian forest biodiversity in human-modified landscapes. *Biological Conservation*, **143**: 2375-2384.

作者简介 林小惠,女,1984年12月,硕士研究生,研究方向为遥感与地理信息系统应用。E-mail: amelynn@126.com
责任编辑 王 伟
