彭飞, 孙国栋. 2017. 1982~1999 年中国地区叶面积指数变化及其与气候变化的关系 [J]. 气候与环境研究, 22 (2): 162-176. Peng Fei, Sun Guodong. 2017. Variation of leaf area index in China from 1982 to 1999 and its relationship with climate change [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (2): 162-176, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16061.

1982~1999年中国地区叶面积指数变化及其与 气候变化的关系

彭飞^{1,2,3} 孙国栋^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029
2 中国科学院大学,北京 100049
3 中国气象局数值预报中心,北京 100081

摘 要 利用 1982~1999 年 AVHRR Pathfinder 卫星遥感观测的植被叶面积指数(leaf area index, LAI)资料和中国 730 个气象台站的温度、降水观测资料,研究了中国不同地区(东北地区、华北地区、长江流域、华南地区和西 南地区)LAI 的季节、生长季和年变化,及其与气候变化(温度、降水)的关系。结果表明,在中国大部分地区, 年平均LAI 和生长季平均LAI 均是增加的。由于区域和季节气候的差异,LAI 变化趋势具有明显的空间和季节非 均一性。从区域平均的角度来看,不同地区年和生长季平均LAI 都有增加趋势,并且在华南地区增加最快。因而, 在全球变化背景下,华南地区可能是潜在的碳汇。在季节尺度上,各地区区域平均LAI 基本上都是增加的,并且 都在春季增加最快。温度变化是LAI 变化的主要原因。但是人类活动如农业活动、城市化等对华北平原、长江三 角洲和珠江三角洲等地区LAI 变化的作用不容忽视。

关键词 叶面积指数(LAI) 植被变化 季节变化 气候变化 人类活动
 文章编号 1006-9585 (2017) 02-0162-15 中图分类号 P467 文献标识码 A doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16061

Variation of Leaf Area Index in China from 1982 to 1999 and Its Relationship with Climate Change

PENG Fei^{1, 2, 3} and SUN Guodong^{1, 2}

1 The State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Using the AVHRR Pathfinder remote sensing data of leaf area index (LAI) during 1982–1999 and observed temperature and precipitation data collected at 730 meteorological stations in China, the changes in seasonal LAI, LAI in the growing season and annual LAI are investigated in different areas of China (including Northeast China, North China, the Yangtze valley, South China and Southwest China). Their relationships with climate change (temperature and precipitation) are also explored. Results show that in most areas of China, annual LAI and LAI in the growing season has been increasing during the study period, which are mainly caused by the rising temperature. Due to the difference in

³ Numerical Weather Prediction Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081

收稿日期 2016-03-23; 网络预出版日期 2016-07-19

作者简介 彭飞,女,1988年出生,博士研究生,主要从事陆面过程模拟不确定性的研究。E-mail: pf_spring@163.com

通讯作者 孙国栋, E-mail: sungd@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金 91437111、41375111

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 91437111 and 41375111)

seasonal and regional climate, there exist obvious regional and seasonal heterogeneities in the LAI variation tendency. From the perspective of regional averages, both annual LAI and LAI in the growing season over different regions demonstrate an increasing trend, especially in South China. Therefore South China might be a potential carbon sink under the context of global change. On the seasonal scale, regional average LAI in different sub-regions basically has been increasing as well, especially in the spring. In addition, changes in LAI are mainly attributed to the variation in temperature. However, impacts of human activities, such as agricultural activities and urbanization, on the LAI changes in the North China Plain, the Yangtze River delta and the Pearl River delta couldn't be ignored.

Keywords Leaf area index, Vegetation change, Seasonal change, Climate change, Human activity

1 引言

植被是陆地生态系统的主体,具有明显的季节 和年际变化,不仅受气候变化影响,而且还能通过 改变地表反照率 (Charney, 1975; Charney et al., 1977; Zeng et al., 1996)、粗糙度 (Sud and Smith, 1985)、 蒸散发 (Shukla and Mintz, 1982) 等对气候变化产 生反馈作用。因此,关于全球和区域植被变化的研 究是认识植被一气候相互作用的基础。近年来,在 全球变化的背景下,植被的活动已经发生改变。在 植被活动变化研究中,基于卫星遥感的归一化植被 指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 由于明确的物理含义和简单的反演算法已被广泛 应用。Myneni et al. (1997b) 分析了 1981~1991 年 NOAA NDVI 数据集,发现北半球植被有增加的趋 势,并将其归因于由于温度升高引起的生长季的延 长, 这和 Keeling et al. (1996) 从大气中 CO2 浓度变 化得到的结论是一致的。Zhou et al. (2001)利用 NOAA/GIMMS NDVI 数据分析了 1991~1999 年北 半球植被活动的变化,结果表明:欧亚大陆高纬度 大部分地区生长季 NDVI 持续增加,而且 NDVI 的 变化和温度变化密切相关。Piao et al. (2003) 同样使 用 NOAA/GIMMS NDVI 数据研究了中国植被变化 及其和气候之间的关系,发现在国家尺度和生物群 落尺度上月和季节平均 NDVI 都有增加的趋势,并 且该趋势存在很大的空间、时间非均一性,并认为 这些主要和区域、季节气候变化有关,同时强调了 人类活动对一些地区如长江三角洲、珠江三角洲等 植被变化的重要影响。

然而,NDVI 是谱植被指数的一种,不是生物物理变量。相对于 NDVI,植被叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 的生态学意义更加明显,即投影 到单位陆面面积上的叶片总面积。并且,在含有生态过程的陆面模式中如 BATS (Dickinson et al.,

1998)、SiB2 (Sellers et al., 1996)和CoLM (Dai et al., 2003),使用的植被参数是LAI而不是NDVI。因而,研究LAI空间分布、变化及其和气候因子之间的关系一方面能够研究全球变化下植被如何进行响应;另一方面能够为长时间尺度上植被一大气相互作用的模拟打下基础,提供对比分析数据,进而改进模式的参数化过程以及提高模式模拟的精度(Chase et al., 1996; Tian et al., 2004)。

目前,关于 LAI 变化及其和气候变化之间关系 的研究很少,特别是在中国地区。Jin and Zhang (2002) 使用 1981~1994 年 AVHRR LAI 数据, 仅 研究了全球7月LAI的变化及其与地表面温度之间 的关系。张佳华等(2002)研究了全球植被叶面积 指数对温度和降水的响应,并指出植被 LAI 与温度 的总体正相关的最大值出现在北半球的中高纬度 地区,而LAI与降水的总体正相关高值出现在亚洲 东部等地区。但是研究时间太短(1982~1990年), 仅9年。黄玫和季劲钧(2010)使用模式和卫星反 演的 LAI 数据分析了中国区域植被 LAI 的时空分 布。结果表明,中国区域植被 LAI 分布整体呈现东 南部高西北部低的趋势,主要受水分条件限制。然 而,他们仅说明了 LAI 对温度、降水的空间依赖性, 并没有研究LAI变化和气候变化之间的关系。所以, 有必要对中国地区长时间尺度上LAI变化及其与气 候变化之间的关系进行系统、全面的研究。

本文使用 1982~1999 年美国卫星遥感资料 AVHRR Pathfinder LAI 数据和来自中国气象局 730 个台站的温度、降水观测数据去研究中国地区季 节、生长季(4~10月)和年平均 LAI 的变化趋 势及其和气候变化之间的关系。为了避免冬季积 雪引起的 LAI 数据误差 (Buermann et al., 2002), 我们只分析了春季、夏季和秋季 LAI 的变化趋势。 此外,为研究不同地区植被总体变化及其与当地 气候因子(温度、降水)之间的关系,参照 Wang and Yan (2009),将中国分为 6 个地区,分别是东北 地区(42.5°N~53°N, 105°E~133°E)、华北地 区(35°N~42.5°N, 105°E~129°E)、长江流域 (27.5°N~35°N, 105°E~123°E)、华南地区 (18°N~27.5°N, 105°E~123°E)、西南地区 (21°N~35°N, 88°E~105°E)和西北地区(35°N~ 48°N, 75°E~105°E)(详见图 1a)。由于西北地区 LAI数据缺省值太多,因此本研究仅限于东北地区、 华北地区、长江流域、华南地区和西南地区,并分 析了季节(春季、夏季、秋季)、生长季和年平均 LAI的变化趋势及其和气候变化之间的关系。

2 数据和方法

2.1 LAI 数据

植被叶面积指数资料来源于美国卫星遥感资料 AVHRR Pathfinder 陆面数据集 (Myneni et al., 1997a),时间长度为 1981 年 7 月至 2001 年 5 月,空间分辨率是 0.5°(纬度)×0.5°(经度),时间分辨率是月平均。这套高分辨率资料已在全球得到广泛应用 (Asner et al., 2003)。Buermann et al. (2002)使用 5 种方法评估了 1981 年 7 月至 1994 年 9 月期间数据集的质量。他们指出,这套 LAI 数据集是植被年际动态变化的可靠"指示器"。在全球气候模式中,这套卫星反演 LAI 数据的使用提高了模式对近地面气候的模拟 (Buermann et al., 2001)。所以,使用这套 LAI 数据集研究中国地区植被变化是有意义的。

本文采用的是 1982 年 1 月至 1999 年 12 月月 平均 LAI 时间序列。如图 la 是中国地区 18 年平均 的 LAI 空间分布,其中的空白是缺测值。可以看到, LAI 总体呈现出东南部高西北部低的空间分布,与 黄玫和季劲钧(2010)的结果一致。在中国主要农 业区如东北平原、华北平原和四川盆地,多年平均 的 LAI 主要集中在 1~2 之间;在干旱—半干旱地 区如呼伦贝尔草原,LAI 主要集中在 0~1 之间;在 东北的大兴安岭—小兴安岭、长白山等以森林为主 要植被类型的地区,LAI 主要集中在 3~4 之间;而 在武夷山区和云南的西南部(植被以常绿针叶林和 常绿阔叶林为主),LAI 最大,通常在 5 以上。

2.2 气候数据

使用的温度、降水数据都来自于中国气象局 730个台站的逐日观测资料。首先,挑选出1982~ 1999年期间没有进行台站迁移而且温度、降水日数 据无缺测现象的气象台站。其中,温度数据符合条 件的台站共有 609 个,降水数据符合条件的台站共 594 个。其次,使用这些符合条件的站点数据获取 研究时期内温度、降水的月平均数据。最后,利用 反距离加权法对站点数据进行插值(冯锦明等, 2004), 形成 1982~1999 年中国地区 0.5°(纬度) ×0.5°(经度)月平均温度、降水数据。如图 1b 和 1c 分别是 18 年平均的温度和年总降水量的空间分 布。该分布与 Piao et al. (2003)研究中 Fig. 2 给出的 1982~1999年18年平均的温度、年总降水量的空 间模态一致。中国地区年平均温度大致在-6~ 30 °C 之间波动,从北到南逐渐增加,从东到西逐 渐减少。年总降水量波动范围很大,在塔克拉玛干 沙漠地区小于 50 mm, 而在华南地区超过了 2000 mm,并且从东南到西北逐渐减少。由于位于青藏 高原地区台站比较少,所以插值结果可能存在很大 误差。但是,本研究只包含了青藏高原的部分地区, 因而这些误差对研究结果的影响不大。

2.3 方法

本文采用最小二乘法计算中国地区每个像元 以及每个研究分区(东北地区、华北地区、长江流 域、华南地区和西南地区)LAI、温度和降水的线 性变化趋势。另外,又使用相关分析诊断LAI变化 和气候变化之间的关系。

3 结果和分析

3.1 中国地区 LAI、温度和降水线性变化趋势 3.1.1 年和生长季平均变化趋势

在 1982~1999 年期间,在中国大部分地区, 年平均 LAI 有增加的趋势(如图 2a 所示),特别是 在华北平原的中部、四川盆地的东部、华南的大部 分地区以及云南的中西部。然而,在长江三角洲和 珠江三角洲附近,LAI 有减少的趋势,这可能与这 两个地区快速的城市化有关。在生长季,大部分地 区 LAI 都有增加趋势。其中,LAI 增加较快的地区 位于华北平原中部和湖南广西贵州三省的交界处, 年增长率都在 0.04/a 以上(图 2b)。并且,与年平 均 LAI 变化趋势的空间分布相比,具有 LAI 减少趋 势的区域扩大,长江三角洲和珠江三角洲地区 LAI 的减少趋势更加明显。

与 LAI 类似,同样考察了 1982~1999 年期间的 温度、降水的变化趋势。从年平均(如图 2c 所示) 上来看,中国几乎所有地区温度呈增加的趋势,特别





是中国北方地区,这和左洪超等(2004)的结果是一致的。与温度的变化趋势不同,年总降水量呈现出中国东部长江以北减少,长江以南增加的模态(图 2e)。这体现了 20 世纪 80 年代和 90 年代中国东部南涝北旱的降水分布状况。在生长季,温度和降水的变化趋势分别与年平均温度、年总降水量的趋势相似(图 2d 和 2f),这里便不再赘述。

3.1.2 季节变化趋势

在季节尺度上,大部分地区春季 LAI 呈现出增加的趋势(如图 3a 所示),特别是华北平原中部、陕西南部、四川中部部分地区、云南中部和华南地区北部,增长率都在 0.06/a 以上,部分地区甚至超过了 0.1/a。只有很少一部分地区春季 LAI 有减少的趋势,减少率均小于 0.02/a。在夏季,和春季 LAI 相比,具有 LAI 减少趋势的范围扩大(图 3b)。在

东北的大兴安岭一小兴安岭地区以及长白山部分 地区,LAI有微弱减少的趋势;而在长江三角洲、 珠江三角洲和云贵高原的部分地区,LAI减少的幅 度较大,减少率在0.02~0.04/a之间。在东北平原、 华北平原、四川盆地部分地区和中国东南部大部分 地区,夏季 LAI是增加的,增幅大都在0.02~0.04/a 之间。在秋季,具有 LAI减少趋势的范围进一步扩 大(图 3c)。在东北大部分地区、广西—贵州交界 处、长江三角洲和珠江三角洲,LAI是减少的。其 余大部分地区 LAI 是增加的,而且增幅较大。

季节温度、降水的变化趋势也呈现出空间上的差 异。在春季,中国大部分地区有增温趋势,特别是中 国北方和东部沿海地区;部分地区温度有减少趋 势,如黑龙江北部和云南小部分地区(图3d)。而春 季降水变化呈现出三极子的空间分布模态,即北方



图 2 中国地区 1982~1999 年的 (a) 年平均 LAI、(b) 生长季平均 LAI, (c) 年平均温度、(d) 生长季平均温度, (e) 年总降水量、(f) 生长季总 降水量的线性变化趋势

Fig. 2 Linear variation trends of (a) annual mean LAI, (b) growing season mean LAI, (c) annual mean temperature, (d) growing season mean temperature, (e) annual total precipitation, and (f) total precipitation in the growing season during the period of 1982–1999 in China



图 3 中国地区 1982~1999 年的(a) 春季平均 LAI、(b) 夏季平均 LAI、(c) 秋季平均 LAI,(d) 春季平均温度、(e) 夏季平均温度、(f) 秋季平 均温度,(g) 春季总降水量、(h) 夏季总降水量、(i) 秋季总降水量的线性变化趋势

Fig. 3 Linear variation trends of (a-c) LAI, (d-f) temperature, and (g-i) total precipitation in spring (left panel), summer (middle panel), and autumn (right panel) during the period of 1982–1999 in China

降水减少,中部降水增加,南方降水减少(图3g)。 在夏季,温度变化趋势的空间分布发生很大变化,北 方地区温度增加,而南方地区温度减少(图3e)。这 可能和夏季降水北减南增的空间分布模态有关(图 3h)。在秋季,中国大部分地区温度是增加的,特别 是北方地区(图3f)。与温度变化趋势的空间分布相 反,秋季降水在中国大部分地区是减少的(图3i)。

综上可知,在中国大部分地区,年和生长季平均 LAI 有增加的趋势。并且,LAI 变化趋势具有明显的空间和季节非均一性。这可能是由区域气候差异和季节变动引起。下面将通过相关分析来研究植被 LAI 变化和气候变化之间的关系。

3.2 LAI 变化和气候变化之间的关系

为了研究植被 LAI 变化与气候变化之间的关 系,分别对年、生长季、春季、夏季和秋季平均 LAI 及同期温度、降水进行了相关分析。

3.2.1 年和生长季的结果

如图 4a 所示,年平均 LAI 和温度在大部分地 区正相关,特别是在长江以北的部分地区,这种相 关性尤其显著(通过了 0.01 的显著性检验)。只有 很少一部分地区LAI和温度负相关,但并不显著(图 4a)。在珠江三角洲地区,LAI和温度负相关。这可 能是因为增温引起该地区温度达到植被生长的上 限,从而不利于植被的生长。由 LAI 和温度之间的 相关性可知,在 1982~1999 年期间,中国大部分 地区 LAI 的增加主要原因之一是温度升高。如图 4b, LAI 和降水在大部分地区正相关, 特别是在靠 近干旱-半干旱带的地区,二者显著正相关(通过 了 0.01 的显著性检验)。这表明在年降水量少的地 区植被生长对降水变化极为敏感,降水增加有利于 植被生长。在陕西—湖北—安徽一带和东北部分地 区,LAI 和降水负相关。这种负相关目前暂时无法 给出合理的解释。

在生长季,中国大部分地区LAI和温度正相关, 特别是在东北的大兴安岭一小兴安岭地区、长白山 和华北平原南部,二者显著正相关(通过了0.05的 显著性检验)。而在华北平原中部和东北平原部分 地区以及云贵高原的大部分地区,LAI和温度负相 关,但并不显著(图4c)。生长季LAI和降水的相 关性的空间分布和年平均结果相似(图4d),这里 不再赘述。在中国大部分地区生长季平均温度升 高,而总降水量在长江以北地区减少,长江以南地 区增加,这说明中国地区生长季LAI的增加可能主 要是因为温度升高。因为温度升高可引起生长季的 延长,从而促进植被的生长(Myneni et al., 1997b; Tucker et al., 2001)。

3.2.2 不同季节的结果

在春季, LAI 和温度在中国地区基本上都是正 相关,特别是在东北的大兴安岭—小兴安岭地区、 长白山、四川盆地和长江中下游平原大部分地区, 二者显著相关(通过了 0.05 的显著性检验)。而在 华北平原部分地区 LAI 和温度负相关, 但并不显著 (图 4e)。虽然华北平原地区温度升高,降水量变 化不大,但是 LAI 明显增加,增长率在 0.06/a 以上, 部分原因可能来自于农业管理水平的提高,如灌 溉、施肥的实施。对于 LAI 和降水, 二者在中国大 部分地区正相关, 而在东北的大兴安岭-小兴安岭 地区、四川盆地东部和东南沿海地区,二者负相关 (图 4f)。因为在大兴安岭一小兴安岭地区,春季 冷而多雪,降水的增加可引起温度降低,生长季可 能延迟开始,这不利于植被的生长。在东南沿海地 区,春季多雨,降水增多可引起云量的增加和入射 太阳辐射的减少,而太阳辐射是该地区植被生长的 主要限制因子之一(Nemani et al., 2003),因而春季 降水的增加不利于该地区植被的生长。

在长江以北的大部分地区尤其是黄土高原,夏 季 LAI 和温度负相关(图 4g)。这是因为在半干旱 地区温度升高增加了植被生长的水分胁迫(Braswell et al., 1997), 阻碍植被生长, 所以 LAI 和温度负相 关。在长江流域, LAI 与温度、降水之间的相关性 正好相反,和温度正相关,和降水负相关(图 4g 和 4h)。可能是因为长江流域属于湿润地区, 植被 生长受到的水分胁迫不大, 而夏季降水的增加伴随 着云的增加、入射太阳辐射的减少和温度的降低, 甚至会引发洪水(许厚泽和赵其国, 1999),进而 导致植被生长的减弱。所以该地区 LAI 的变化和温 度变化一致,而和降水的变化相反。在靠近干旱--半干旱带的地区, LAI 与温度、降水之间的相关性 是相反的,和温度负相关,而和降水显著正相关(图 4g和4h)。因为这些地区植被生长受土壤水分的影 响比较大,降水的增加能够增加植被可利用水分, 而温度的降低可减少蒸散发,提高植被的水分利用 率,从而促进植被的生长。故该地区 LAI 的变化和 降水变化一致,和温度变化相反。

秋季,在中国大部分地区LAI和温度正相关(图 4i),特别是在东北的大兴安岭一小兴安岭地区和四



图 4 相关系数的空间分布: (a、b)年、(c、d)生长季、(e、f)春季、(g、h)夏季和(i、j)秋季 LAI 与温度(左列)、降水(右列)之间的相关 系数(±0.46、±0.59分别和 0.05、0.01 的显著性水平相对应)

Fig. 4 Spatial distributions of correlation coefficients between LAI and (a) annual mean temperature, (c) average temperature in the growing season, (e) average temperature in the spring, (g) average temperature in the summer, and (i) average temperature in the autumn; and between LAI and (b) annual mean total precipitation, (d) precipitation in the growing season, (f) precipitation in the spring, (h) precipitation in the summer, and (j) precipitation in the autumn (± 0.46 and ± 0.59 correspond to the 0.05 and 0.01 significance levels, respectively)

川盆地,二者显著正相关(通过了 0.05 的显著性检验)。相反地,LAI 和降水在中国大部分地区负相关。 秋季温度的升高可推迟植被休眠,延长植被生长季,进而促进植被生长。而降水的增加会引起温度的降低,对植被的生长不利。

由以上分析可知,从年和生长季来看,中国大部分地区植被 LAI 的增加主要是由于温度升高。在

东北大部分地区,LAI 和温度显著正相关。这说明 在中国高纬度寒冷地区植被生长对温度极其敏感。 在靠近干旱—半干旱带的地区,LAI 和降水显著正 相关。这体现了在干旱—半干旱带附近水分是限制 植被生长的主要因子之一。此外,人类活动如农业 活动、城市化等对华北平原、长江三角洲和珠江三 角洲等地区 LAI 变化也起到了重要作用。

3.3 区域平均植被 LAI 变化及其与气候变化之间 的关系

另外,为了考察中国不同地区植被的总体变 化,从区域平均的角度研究了在中国的东北地区、 华北地区、长江流域、华南地区和西南地区区域平 均的 LAI 变化以及它们与同期气候变化之间的关 系。

3.3.1 东北地区

在 1982~1999 年期间,东北地区年和生长季 平均 LAI 呈现出增加趋势,增长率分别是 0.0073/a 和 0.0088/a (图 5a 和 5d)。由于各地区植被状况不 同,我们又计算了 LAI 的平均相对增长率,亦即 LAI 增长率与多年平均 LAI 之间的比值。在这里, 年和生长季的平均相对增长率分别是 0.0031/a 和 0.0025/a。但是,降水量变化不大,而温度不断增 加(图 5b、5c、5e、5f)。LAI的增加和温度升高是一致的。年和生长季平均LAI分别与同期温度显著 正相关,相关系数分别是 0.6316 和 0.4652 (均通过 了 0.05 的显著性检验);而与同期降水之间的相关 系数分别是 0.2701 和 0.3469。所以,年和生长季平 均 LAI 的变化受温度和降水共同影响,但是在研究 时期内温度变化对 LAI 变化影响似乎更大。

就季节变化趋势而言,春、夏两季 LAI 都是增加的,其中春季 LAI 增加最快,增长率是 0.0132/a, 平均相对增长率是 0.0087/a。而秋季 LAI 有微弱减小的趋势。在春、夏、秋三个季,温度都增加,增 长率分别是 0.0591 °C/a、0.0401 °C/a 和 0.0409 °C/a。 3 个季节的总降水量均有微弱减少的趋势。所以, 季节平均 LAI 的变化与温度变化更为一致。通过相 关分析可知,在春季和秋季,季节平均 LAI 和温度



图 5 1982~1999 年东北地区的年平均(左列)、生长季平均(右列)(a、d)LAI、(b、e)温度和(c、f)总降水量的变化 Fig. 5 The variations of annual mean and growing season mean (a, d) LAI, (b, e) temperature, and (c, f) total precipitation averaged in the Northeast China during the period of 1982–1999

显著正相关,相关系数分别是 0.7573 和 0.5630 (均 通过了 0.05 的显著性检验)。而夏季 LAI 和温度相 关性不大,相关系数仅为 0.0996。3 个季节 LAI 和 季节总降水量的相关性较小,相关系数均不足 0.1500。春、秋两季 LAI 和降水之间弱的相关性可 能是因为降水增加引起温度的降低,可能引起生长 季的缩短,并且伴随入射太阳辐射的减少,不利于 植被的生长。综上,春季 LAI 的快速增加主要是因 为温度升高。

3.3.2 华北地区

在华北地区,年和生长季平均LAI都有增加的 趋势,增长率分别是0.0119/a和0.0164/a(图6a和 6d),年和生长季平均相对增长率分别是0.0079/a 和0.0074/a,比东北地区同期LAI(平均相对)增 长率大很多。在研究时期内,年和生长季总降水量 有减少趋势(图 6c 和 6f)。降水减少不利于植被的 生长。而年和生长季平均温度升高,增长率分别是 0.0774 °C/a 和 0.0466 °C/a(图 6b 和 6e)。因此, LAI 变化和温度变化是一致的。年和生长季平均 LAI 均 与同期温度正相关,相关系数分别是 0.4794、 0.2741;而和同期的总降水量之间的相关系数分别 是 0.3857、0.3076。因而,年和生长季平均 LAI 变 化受温度和降水共同影响,但是在研究时期内,温 度变化对植被变化的贡献更大。研究指出,20 世纪 80 年代以来华北地区由于温度的升高和降水的减 少,干旱化趋势在加剧(马柱国和符淙斌,2006)。 该地区是中国主要农耕区之一,干旱化的加剧不利 于农作物的生长。然而,该区域 LAI 有增加的趋势。 由此可见,农业活动如灌溉、施肥等对农作物生长 的促进作用是不可忽视的。所以,华北地区植被变



图 6 同图 5,但为华北地区 Fig. 6 Same as Fig. 5, but for the North China

化可能是气候变化和人类活动共同作用的结果,这 一点与 Piao et al. (2003)使用 NDVI 指数探讨中国植 被变化时得到的结论类似。

在季节尺度上,春、夏、秋三季 LAI 都增加。 从增长率来看,春季 LAI 增加最快,增长率是 0.0194/a;而夏季 LAI 增加最慢,增长率是 0.0104/a。 从平均相对增长率来看,同样是春季 LAI 增加最快 (0.0194/a),夏季 LAI 增加最慢(0.0039/a)。春、 夏、秋三个季节平均温度也都是增加的,增长率分 别是 0.0592 °C/a、0.0594 °C/a、0.0508 °C/a。而春、 秋两季总降水量有微弱减少趋势,夏季降水量有微 弱增加的趋势。所以,季节平均 LAI 的变化和同期 温度变化更为一致。由相关分析可知,对于春季和 秋季,季节平均 LAI 和温度显著正相关,相关系数 分别是 0.5687、0.5650(均通过了 0.05 的显著性检 验)。而夏季 LAI 和温度相关性不大,相关系数仅为 0.0030。春、夏两季 LAI 和降水显著正相关,相 关系数分别是 0.4107、0.4344(仅通过了 0.1 的显 著性检验)。而在秋季,二者负相关。所以,秋季 降水的减少和温度的升高都有利于该季节 LAI 的增加。秋季 LAI 的增长率是 0.0120/a,平均相对增长 率是 0.0068/a,仅次于春季 LAI 的增加幅度。 3.3.3 长江流域

在长江流域,年和生长季平均 LAI 是增加的, 增长率分别是 0.0171/a 和 0.0197/a (图 7a 和 7d), 平均相对增长率分别是 0.0073/a 和 0.0065/a。和华 北地区类似,长江流域年和生长季总降水量变化不 大(图 7c 和 7f);而温度呈现增加趋势,增长率 分别是 0.0599 °C/a、0.0437 °C/a(图 7b 和 7e)。 LAI 的增加和温度升高是一致的。年和生长季平均



图 7 同图 5,但为长江流域 Fig. 7 Same as Fig. 5, but for the Yangtze River basin

LAI分别与同期温度显著正相关,相关系数分别是 0.5575、0.4883(均通过了 0.05 的显著性检验); 而和同期总降水量之间的相关系数分别是 0.0723、 -0.1267,相关性不大。所以,年和生长季平均 LAI随时间的变化主要受温度变化影响,受降水变 化影响较小。

春、夏、秋三季 LAI 都增加。从增长率来看, 3 个季节中春季 LAI 增加最快,增长率是 0.0300/a; 而秋季 LAI 增加最慢,增长率是 0.0107/a。从平均 相对增长率来看,同样也是春季 LAI 增加最快

(0.0156/a)。春、夏、秋三季平均温度都在增加, 增长率分别是 0.0490 °C/a、0.0402 °C/a、0.0459 °C/a。 春、夏两季总降水量有增加趋势,增长率分别是 2.6548 mm/a、3.7523 mm/a。而秋季总降水量有明 显的减少趋势,平均每年减少 6.5200 mm。所以, 季节平均 LAI 的变化和同期温度变化比较一致。由 相关分析得到,春、夏、秋三季平均LAI分别与同 期温度正相关,相关系数分别是 0.5331、0.5573、 0.3991。LAI 和降水只在春季正相关,相关系数是 0.3727。在夏季和秋季二者微弱负相关。所以,长 江流域春季LAI的快速增加是由于温度升高和降水 的增加。

3.3.4 华南地区

在华南地区,年和生长季平均LAI都有增加趋势,增长率分别是0.0176/a和0.0207/a(图8a和8d), 平均相对增长率分别是0.0054/a和0.0056/a。年和 生长季总降水量都有较大的增加趋势,增长率分别 是6.5661 mm/a、9.7714 mm/a(图8c和8f)。年和 生长季平均温度也是增加的,增长率分别是 0.0422 °C/a、0.0141 °C/a(图8b和8e)。由相关分 析得到,年和生长季LAI分别与同期温度正相关, 相关系数分别是0.4391、0.2846;而和同期总降水



图 8 同图 5,但为华南地区 Fig. 8 Same as Fig. 5, but for the South China

量的正相关性较小,相关系数分别是 0.0314、 0.1394。所以,尽管在研究期间内年和生长季总 降水量明显增加,但这可能对这两个时期植被增 加贡献不大,而植被 LAI 增加主要是因为温度升 高。

在春、夏、秋三个季节,LAI都增加。不管从 增长率还是平均相对增长率来看,3 个季节中春季 LAI增加最快,增长率是0.0435/a,平均相对增长 率是0.0183/a;而秋季LAI增加最慢,增长率是 0.0011/a,平均相对增长率是0.0003/a。温度在春季 和秋季呈现升高趋势,增长率分别是0.0546°C/a 和0.0219°C/a;而在夏季有微弱减小趋势,这可能 和夏季降水的较大增加趋势有关。在夏季,降水的 增长率是14.6548 mm/a;而在春、秋两季,有减小 的趋势,减小率分别是2.7911 mm/a和4.2153 mm/a。 由相关分析可知,春、夏、秋三个季节LAI都和同 期温度正相关,相关系数分别是 0.5261、0.1360 和 0.1510。关于 LAI 和降水,二者在春、秋两季相关 性很小,相关系数不到 0.1;而在夏季正相关,相 关系数是 0.2530。所以,春季 LAI 的增加主要是因 为温度升高;夏季 LAI 的增加是由于温度升高和降 水的增加;而秋季 LAI 缓慢的变化趋势是温度升高 和降水减少共同作用的结果。

3.3.5 西南地区

在西南地区, 年和生长季平均 LAI 均呈现出增加趋势, 增长率分别是 0.0102/a 和 0.0090/a (图 9a 和 9d); 平均相对增长率 0.0037/a 和 0.0029/a。年和生长季总降水量有增加趋势, 温度也不断升高(图 9b、9c、9e、9f)。由相关分析可知, 年和生长季平均 LAI 与同期温度正相关, 相关系数分别是 0.4655、0.1743; 并且和同期总降水量显著正相关, 相关系数分别是 0.4161、0.4721 (均通过了 0.1 的



图 9 同图 5,但为西南地区 Fig. 9 Same as Fig. 5, but for the Southwest China

显著性检验)。综上可知,年和生长季平均 LAI 随时间的增加是温度升高和降水增加共同作用的结果。

在季节尺度上,春、夏、秋三季 LAI 都增加。 其中,春季 LAI 增加最快,增长率是 0.0224/a;而 夏季 LAI 增加最慢,增长率是 0.0018/a。平均相对 增长率的结果与增长率的类似。LAI 的平均相对增 长率在春季最大为 0.0129/a; 而在夏季最小, 是 0.0005/a。温度在春、夏、秋三个季节有升高趋势, 增长率分别是0.0612°C/a、0.0234°C/a和0.0452°C/a。 降水在春、夏两季有增加趋势,增长率分别是0.9910 mm/a 和 1.6201 mm/a; 而在秋季, 有减少趋势, 变 化率是 0.8161 mm/a。由相关分析可知,在春、秋两 季,LAI都和温度正相关,相关系数分别是0.3795、 0.2701。而在夏季, LAI 和温度几乎不相关, 相关系 数仅为-0.0500。关于 LAI 和降水, 二者在春、夏两 季正相关,相关系数分别是0.2434、0.2808;而在秋 季负相关,相关系数是-0.3202。所以,在春、秋两 季,LAI的变化是温度和降水变化共同作用的结果; 而在夏季, LAI 的变化主要与降水变化有关。

由以上分析可知,在 1982~1999 年期间,各个 研究区域内,年和生长季植被 LAI 都有增加趋势。 在东北地区和华北地区,年和生长季 LAI 变化受温 度和降水共同影响。但是,温度变化对 LAI 变化受 贡献似乎更大。在长江流域和华南地区,年和生长季 LAI 变化主要与温度有关,受降水影响不大。因而, 这两个区域内,温度变化是引起 LAI 变化的主要原 因。在西南地区,年平均 LAI 变化受温度和降水共 同的影响。然而,生长季 LAI 变化受降水影响更大。

在季节尺度上,各个研究区域内,不同季节 LAI 都有增加趋势,除东北地区秋季 LAI 之外。并且, 对同一研究区域来说,不管从增长率还是平均相对 增长率来看,春季 LAI 的增幅往往是最大的。在所 有研究区域内,华南地区春季 LAI 增加最快。温度 升高是各区域春季 LAI 增加的主要原因之一。而降 水变化对季节 LAI 变化的影响随研究区域而变。例 如,在华南地区,春季 LAI 变化受降水影响较小; 而在西南地区,夏季 LAI 变化主要与降水变化有关。

4 总结和讨论

本文利用 1982~1999 年间的美国卫星遥感资料 AVHRR Pathfinder LAI 数据,研究了中国地区不

同季节、生长季和年平均植被的变化及其与同期气 候变化之间的关系。结果表明,1982~1999 年的 18 年来,年平均 LAI 在中国大部分地区具有增加趋 势,特别是在华北平原、四川盆地、东南部大部分 地区以及云南中西部。温度升高是 LAI 增加的主要 原因之一。然而,在长江三角洲、珠江三角洲和东 北的部分地区,LAI 有减少的趋势。其中,在长江 三角洲和珠江三角洲,LAI 的减少与当地快速的城 市化有关。

与年平均的结果类似,在生长季,中国大部分 地区 LAI 同样具有增加的趋势。其中,增加较快的 地区位于华北平原的南部和湖南一广西一贵州三 省的交界处。但是,与年平均 LAI 变化趋势的空间 分布相比,具有 LAI 减少趋势的范围扩大,长江三 角洲和珠江三角洲地区的 LAI 减少更加明显。

对不同季节来说(春季、夏季和秋季),中国 地区 LAI 变化趋势存在明显的空间和季节非均一 性,这和区域气候变化差异和季节变动有关。在各 个季节,大部分地区LAI变化主要和温度变化有关。 然而,人类活动对植被变化的作用也是不容忽视 的。例如灌溉、施肥等农业活动对华北部分地区LAI 的增加起到重要作用,而快速的城市化是引起长江 三角洲和珠江三角洲地区各季节LAI减少的重要因 素之一。另外,由于数据的局限性,无法严格区分 气候变化、人类活动和二氧化碳增加等因素对华北 部分地区LAI 变化的不同贡献,这为未来利用数值 模式提供了挑战。同时,在珠江三角洲地区LAI 和 温度负相关的机制未完全讨论,可利用数值模式进 行进一步的机制分析。

从区域平均的角度来看,在东北地区、华北地 区、长江流域、华南地区和西南地区,年平均 LAI 都有增加趋势。其中,华南地区 LAI 的增长率最大, 这表明在全球变化背景下华南地区可能是一个巨 大的潜在碳汇。生长季 LAI 也都有增加的趋势,但 是增长率随区域而变,并在华南地区最大。就季节 而言,除了东北地区秋季 LAI 有微弱减少的趋势之 外,其余各地区各季节 LAI 都有不同程度的增加。 而且,各地区 LAI 的增长率均在春季达到最大,这 与其他研究者使用卫星遥感 NDVI 数据得到的结果 是一致的(朴世龙和方精云,2003;陈怀亮等,2009)。 另外,在所有研究区域内,华南地区春季 LAI 增加 最快(增长率最大)。温度升高是各区域春季 LAI 增加的主要原因之一。而降水变化对季节 LAI 变化 2 期彭飞等: 1982~1999 年中国地区叶面积指数变化及其与气候变化的关系No. 2PENG Fei et al. Variation of Leaf Area Index in China from 1982 to 1999 and Its Relationship with Climate Change 175

的影响随研究区域而变。例如,在华南地区,春季 LAI 变化受降水影响较小;而在西南地区,夏季 LAI 变化主要与降水变化有关。

黄玫和季劲钧(2010)分析了利用不同反演算 法以及大气一植被相互作用模型(AMIP2)得到的 中国区域LAI数据,通过对比LAI在空间分布和季 节变化方面的特征指出了不同LAI数据的优缺点以 及可能的减小LAI不确定性的改进方案。Tian et al. (2004)对比分析了MODISLAI与CLM模式(the CommonLand Model)模拟的LAI。他们指出模式需 要更好地量化LAI和SAI (stem area index),在FPAR (fraction of photosynthetically active radiation)和反 照率的参数化方案中应该对二者加以区分。因而, 参照本文得到的各个季节、生长季和年平均LAI的 变化及其与气候变化的关系,未来可评估模式对 LAI及其对气候变化响应的模拟能力,进而寻找提 高模式模拟能力的途径和方法。

参考文献(References)

- Asner G P, Scurlock J M O, Hicke J A. 2003. Global synthesis of leaf area index observations: Implications for ecological and remote sensing studies [J]. Global Ecology and Biogeography, 12 (3): 191–205, doi: 10.1046/j.1466-822X.2003.00026.x.
- Braswell B H, Schimel D S, Linder E, et al. 1997. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability [J]. Science, 278 (5339): 870–873, doi: 10.1126/science.278.5339.870.
- Buermann W, Dong J R, Zeng X B, et al. 2001. Evaluation of the utility of satellite-based vegetation leaf area index data for climate simulations [J].
 J. Climate, 14 (17): 3536–3550, doi: 10.1175/1520-0442(2001)014<3536: EOTUOS>2.0.CO;2.
- Buermann W, Wang Y J, Dong J R, et al. 2002. Analysis of a multiyear global vegetation leaf area index data set [J]. J. Geophys. Res., 107 (D22): ACL 14-1–ACL 14-16, doi: 10.1029/2001JD000975.
- Charney J G. 1975. Dynamics of deserts and drought in the Sahel [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 101 (428): 193–202, doi: 10.1002/qj.49710142802.
- Charney J, Quirk W J, Chow S H, et al. 1977. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions [J]. J. Atmos. Sci., 34 (9): 1366–1385, doi: 10.1175/1520-0469(1977)034<1366: ACSOTE>2.0.CO;2.
- Chase T N, Pielke R A, Kittel T G F, et al. 1996. Sensitivity of a general circulation model to global changes in leaf area index [J]. J. Geophys. Res., 101 (D3): 7393–7408, doi: 10.1029/95JD02417.
- 陈怀亮, 徐祥德, 杜子璇, 等. 2009. 黄淮海地区植被活动对气候变化的 响应特征 [J]. 应用气象学报, 20 (5): 513–520. Chen Huailiang, Xu Xiangde, Du Zixuan, et al. 2009. Vegetation activity responses to climate change in the Huang-Huai-Hai area based on GIMMS NDVI dataset [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 20 (5): 513–520,

doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2009.05.001.

- Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 84 (8): 1013–1023, doi: 10.1175/BAMS-84-8-1013.
- Dickinson R E, Shaikh M, Bryant R, et al. 1998. Interactive canopies for a climate model [J]. J. Climate, 11 (11): 2823–2836, doi: 10.1175/1520-0442(1998)011<2823:ICFACM>2.0.CO;2.
- 冯锦明,赵天保,张英娟. 2004. 基于台站降水资料对不同空间内插方 法的比较 [J]. 气候与环境研究, 9 (2): 261–277. Feng Jinmin, Zhao Tianbao, Zhang Yingjuan. 2004. Intercomparison of spatial interpolation based on observed precipitation data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (2): 261–277, doi: 10.3969/j.issn.1006-9585. 2004.02.004.
- 黄玫, 季劲钧. 2010. 中国区域植被叶面积指数时空分布—机理模型模 拟与遥感反演比较 [J]. 生态学报, 30 (11): 3057–3064. Huang Mei, Jin Jinjun. 2010. The spatial-temporal distribution of leaf area index in China: A comparison between ecosystem modeling and remote sensing reversion [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 30 (11): 3057–3064.
- Jin M, Zhang D L. 2002. Observed variations of leaf area index and its relationship with surface temperatures during warm seasons [J]. Meteor. Atmos. Phys., 80 (1–4): 117–129, doi: 10.1007/s007030200019.
- Keeling C D, Chin J F S, Whorf T P. 1996. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements [J]. Nature, 382 (6587): 146–149, doi: 10.1038/382146a0.
- 马柱国, 符淙斌. 2006. 1951~2004 年中国北方干旱化的基本事实 [J]. 科学通报, 51 (20): 2429–2439. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2006. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004 [J]. Chinese Science Bulletin, 51 (23): 2913–2925, doi: 10.3321/j.issn: 0023-074X.2006.20.016.
- Myneni R B, Ramakrishna R, Nemani R, et al. 1997a. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 35 (6): 1380–1393, doi: 10.1109/36. 649788.
- Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. 1997b. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 [J]. Nature, 386 (6626): 698–702, doi: 10.1038/386698a0.
- Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. Science, 300 (5625): 1560–1563, doi: 10.1126/science.1082750.
- 朴世龙,方精云. 2003. 1982~1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异 [J]. 地理学报, 58 (1): 119–125. Piao Shilong, Fang Jingyun. 2003. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China between 1982 and 1999 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (1): 119–125, doi: 10.11821/xb200301014.
- Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. 2003. Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999 [J]. J. Geophys. Res., 108 (D14): 4401, doi: 10.1029/2002JD002848.
- Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMS. Part I: Model formulation [J]. J. Climate, 9 (4): 676–705, doi: 10.1175/1520-0442 (1996)009<0676:ARLSPF>2.0.CO;2.

- Shukla J, Mintz Y. 1982. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate [J]. Science, 215 (4539): 1498–1501, doi: 10.1126/ science.215.4539.1498.
- Sud Y C, Smith W E. 1985. The influence of surface roughness of deserts on the July circulation: A numerical study [J]. Bound.-Layer Meteor., 33 (1): 15–49, doi: 10.1007/BF00137034.
- Tian Y, Dickinson R E, Zhou L, et al. 2004. Comparison of seasonal and spatial variations of leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and Common Land Model [J]. J. Geophys. Res., 109 (D1): D01103, doi: 10.1029/2003JD003777.
- Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, et al. 2001. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999 [J]. International Journal of Biometeorology, 45 (4): 184–190, doi: 10.1007/s00484-001-0109-8.
- Wang Y, Yan Z W. 2009. Trends in seasonal precipitation over China during 1961–2007 [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2 (3): 165–171, doi: 10.1080/16742834.2009.11446798.
- 许厚泽,赵其国. 1999. 长江流域洪涝灾害与科技对策 [M]. 北京:科学 出版社, 317pp. Xu Houze, Zhao Qiguo. 1999. The Flood Disaster and

Scientific Strategies in Yangtze River Basin (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 317pp.

- Zeng N, Dickinson R E, Zeng X B. 1996. Climatic impact of Amazon deforestation—A mechanistic model study [J]. J. Climate, 9 (4): 859–883, doi: 10.1175/1520-0442(1996)009<0859:CIOADM>2.0.CO;2.
- 张佳华, 符淙斌, 延晓冬, 等. 2002. 全球植被叶面积指数对温度和降水 的响应研究 [J]. 地球物理学报, 45 (5): 631-637. Zhang Jiahua, Fu Congbin, Yan Xiaodong, et al. 2002. Global respondence analysis of LAI versus surface air temperature and precipitation variations [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 45 (5): 631-637, doi: 10.3321/j.issn: 0001-5733.2002.05.005.
- Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. 2001. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999 [J]. J. Geophys. Res., 106 (D17): 20069–20083, doi: 10.1029/2000JD000115.
- 左洪超, 吕世华, 胡隐樵. 2004. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势 分析 [J]. 高原气象, 23 (2): 238–244. Zuo Hongchao, Lü Shihua, Hu Yinqiao. 2004. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in China in the last 50 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (2): 238–244, doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2004.02.017.