2000~2013年中国植被叶片聚集度系数时空变化特征

朱高龙

闽江学院地理科学系, 福州 350108

E-mail: zhugaolong@163.com

2015-09-01 收稿, 2015-11-23 修回, 2015-12-20 接受, 2016-03-25 网络版发表

国家自然科学基金(41271354)、福建省自然科学基金指导性科技计划(2012D105)和福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划(JA13245)资助

摘要 聚集度系数(clumping index, CI)表征了植被叶片在空间分布的随机程度, 作为一个重要的植被结构参数, 它强烈影响冠层辐射传输、光合作用及陆气交互过程. 本文利用MODIS BRDF模型参数产品提取了中国区域2000~2013年每8天的500 m分辨率CI, 并分析其时空变化特征. 研究结果表明CI在空间分布上具有明显的地域差异, 并且与地表覆盖类型密切相关. 平均而言, 落叶针叶林和常绿针叶林具有最小CI, 代表叶片聚集程度最大, 常绿阔叶林、落叶阔叶林和常绿灌木林次之, 耕地和草地的CI值最大. 各种植被类型CI具有明显的季相变化, 但是不同植被类型CI季相表现差别很大. CI与年均温度和年均降水量相关性不显著. 基于MODIS数据提取的CI能够捕捉到不同植被类型叶片空间分布特征的时空变化规律, 这对于提高我国生态、水文、气候及其他地表过程模型的模拟精度具有重要价值.

关键词 聚集度系数, 时空变化, 多角度遥感, MODIS, NDHD

在大多自然情况下, 植被叶片在空间分布并不是随机的, 而呈丛生分布, 比如叶片在树群、树冠、树枝、叶簇等不同层次上都呈现不同程度的聚集现象. Nilson^[1]基于改进的Beer定律首次提出刻画叶片空间分布方式的叶片聚集度系数(clumping index, CI), 它表征了叶片实际空间分布偏离随机分布的程度. Chen和Black^[2]进一步将CI定义为有效叶面积指数(effective leaf area index, LAI_e)与真实叶面积指数(leaf area index, LAI)的比值($CI=LAI_e/LAI$). 极少数作物的叶片空间分布模式有可能是随机分布($CI=1$)或规则分布($CI>1$), 但绝大多数的自然植被叶片都是聚集分布($CI<1$), CI值越小, 叶片分布聚集程度越大, 如针叶林叶簇聚集现象明显, 其LAI_e较真实LAI低30%~70%^[3,4]. CI是除LAI外的另一个重要的植被结构参数, 表征了冠层叶片的空间分布集聚程度, 它可以将LAI_e转化为真实LAI, 同时还可以区分冠层的

照叶和阴叶, 从而改进各种地表过程模型. Chen等人^[5]研究表明, 如果不考虑叶片聚集效应, 直接利用LAI_e估算的全球总初级生产力(GPP)可能被低估9%; 如果不利用CI区分冠层的光照叶和阴叶, 直接利用LAI估算的全球GPP可能被高估12%. 所以, 为了在大尺度上准确地模拟地表生态系统与大气的相互作用, 需要可靠的叶片聚集度信息, 但是由于其获取困难, 大多数地表过程模型仅考虑CI随植被类型的变化, 而没有考虑它的时空变化, 从而制约了LAI和模型模拟精度的提高, 增加了模拟结果的不确定性.

双向反射率分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)刻画了地物反射太阳辐射的各向异性行为, 造成各向异性散射的原因除了地物本身的光学属性外, 最主要的是地物形态结构的差异, 因此BRDF包含着地表结构信息, 可以用来反演地表结构参数^[6-9], 但是由于多角度遥感数据的

引用格式: 朱高龙. 2000~2013年中国植被叶片聚集度系数时空变化特征. 科学通报, 2016, 61: 1595–1603

Zhu G L. Spatial-temporal characteristics of foliage clumping index in China during 2000–2013 (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1595–1603, doi: 10.1360/N972015-00987

欠缺, 基于多角度遥感的CI反演理论与技术研究开展较晚, 现在已经引起越来越多国内外学者的重视. 近年来, 国际上开展了将BRDF核驱动模型与多角度遥感数据相结合反演CI的一系列研究, 基本上可以分为两大类. 第一类是利用核驱动模型的各向同性参数构造角度指数反演CI, 如Roujean和Lacaze^[10]基于地球反射偏振与方向测量(Polarization and Directionality of Earth Reflectance, POLDER)数据, 利用红光和近红外波段的核驱动模型各向同性参数, 构造了垂直差异植被指数和垂直比值植被指数, 用于全球CI的快速制图; 第二类是利用特征角度(如“热点”和“暗点”)反射率构建角度指数提取CI. 所谓“热点”反射率(ρ_h)是指观测主平面上当传感器视线与太阳入射光线完全重合时观测到的最大后向反射率, 此时传感器视野内都是地物光照面; 与之相反, “暗点”反射率(ρ_d)是指观测主平面上观测到的最小前向反射率, 因为“暗点”视野内包含最多的地物阴影. “热点”和“暗点”隐含着强烈的植被结构信息, 2001年Chen等人^[11]构造了热点与暗点指数(hotspot and darkspot index, $HDS=(\rho_h-\rho_d)/(\rho_d)$), 发现CI与HDS存在很好的负相关关系. 2003年Chen等人^[12]又发展了归一化热点和暗点指数(normalized difference between hotspot and darkspot, $NDHD=(\rho_h-\rho_d)/(\rho_h+\rho_d)$), 认为NDHD与CI具有更好的线性关系. 此后基于POLDER数据提取的NDHD开始用于全球6 km分辨率的CI制图^[13-15]. 最近, 部分学者利用中等分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)或多角度成像光谱仪Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR)数据提取NDHD反演更高空间和时间分辨率的全球或区域CI^[16-20].

国内研究者也把聚集度系数称为聚集指数、丛生指数或尼尔逊参数等^[21-23]. 相对国内叶面积指数研究较为深入而言, 国内CI定量遥感研究还处于探索阶段, 仅有少量相关成果见于报道^[24,25]. 近年来部分国内学者在遥感反演LAI时也开始考虑CI的应用^[26-28], 但是由于缺少可用的CI产品, 大部分研究仅仅根据植被类型赋予CI某一固定值, 而不考虑其时空变化, 这难免带来各种误差. 本文利用MODIS BRDF模型参数产品提取了中国区域2000~2013年500 m分辨率CI, 分析了这14年间主要植被类型的CI空间分布模式及其季节与年际变化规律, 为MODIS

CI产品在中国应用的适宜性提供科学参考依据.

1 数据与方法

1.1 反演模型介绍

利用NDHD指数反演CI需要可靠的“热点”和“暗点”反射率信息, 在现有的多角度传感器中, 仅有POLDER可以满足这一需要, 但其空间分辨率为6 km, 远低于现有中等分辨率对地观测遥感资料(MODIS, AVHRR和VEGETATION)和很多地表模型的空间分辨率(1 km), 因此限制了POLDER CI的实用性. 基于500 m分辨率的MODIS BRDF产品(MCD43A1), 采用线性RossThick-LiSparseR BRDF核驱动模型(Ross-Li模型)可以拟合任意角度(包括“热点”与“暗点”)的反射率^[6,29]. 但是很多研究证实Ross-Li模型会严重低估“热点”反射率^[30,31]. Zhu等人^[18]通过修正Ross-Li模型中的体散射核和几何光学核, 发展了可以准确模拟“热点”反射率的改进型Ross-Li模型. 本文采用该改进型Ross-Li模型, 基于MCD43A1近红外波段数据模拟太阳天顶角为45°时的“热点”与“暗点”反射率用于计算NDHD, 然后采用根据4尺度模型模拟的NDHD与CI线性关系^[13](针叶林CI=-0.61×NDHD+0.82, 其他植被类型CI=-1.40×NDHD+1.28)反演中国区域2000~2013年每8天的500 m分辨率CI. 多位研究者已经利用大量的野外实测数据验证了该方法提取的MODIS CI具有较高的可靠性^[17,18,20].

1.2 数据处理

从MODIS数据产品网站下载了覆盖全国的2000~2013年的MODIS BRDF模型参数产品(MCD43A1)和其产品质量标识数据(MCD43A2). MCD43A1产品提供线性核驱动BRDF模型所需的3个BRDF模型核参数, 利用这3个核参数可以计算任意角度的地表二向反射率. MCD43A1产品是利用Terra与Aqua两颗卫星上MODIS传感器16 d连续观测的数据拟合而成的, 每8天生生成1期数据, 名义空间分辨率为500 m, 实际空间分辨率为463.3 m, 中国大陆区域每期包含20景的MCD43A1数据. 首先利用MRT工具分别对每期20景的MCD43A1和MCD43A2数据进行拼接, 并将其Sin投影转换为Albers投影, 经裁剪获得中国大陆区域像元(8729行×10458列), 然后提取近红外波段的3个BRDF模型核参数和其对应的质量信息, 选择

MCD43A2中近红外波段质量标识为0(best quality, full inversion)或1(good quality, full inversion)像元的BRDF数据,利用改进型Ross-Li模型计算近红外波段“热点”与“暗点”反射率用于反演CI。虽然本文已经剔除了雪盖影响,并利用最优质量的BRDF数据进行反演,但是少数像元反演结果仍然有可能出现异常值或不合理的涨落。通过CI时间序列的平滑可以大大减小这种误差,首先剔除小于0.3或大于1.0的异常反演值,再利用局部调节3次样条插值法(LACC)进行时间序列平滑^[32],从而获取CI季节变化轨迹。

地表覆盖类型数据使用1 km分辨率的GLC2000全球地表覆盖数据,对其进行与MODIS数据相应的投影变换、重采样和裁剪处理。为减少CI的地形影响,由国际热带农业中心(CIAT)下载了覆盖全国的90 m分辨率的数字高程模型(SRTM4.1 DEM)数据,采用Pisek等人^[15]发展的方法对反演的CI进行地形订正。为分析CI与温度和降水量的关系,用反距离权重法对全国基本气象站2000~2013年的逐日气温和降水数据进行空间插值,生成463.3 m空间分辨率的年平均气温和降水量分布图^[33]。在气温数据插值时,假设气温垂直递减率为0.6℃/100 m。

2 结果与分析

2.1 空间分布特征

图1(a)显示2000~2013年中国区域14 a生长季(4~9月)CI平均值,从中可以看出,CI与地表覆盖类型分布模式(图1(b))基本吻合,这证明了本研究提取的CI具有一定的合理性。落叶针叶林在各种植被类型中具有最小的多年生长季CI平均值(CI=0.63),主要分布在我国北方的大兴安岭、小兴安岭、长白山脉、阿尔泰山脉、天山山脉等地区,其中大兴安岭北部的寒温带森林CI低值区尤为明显。常绿针叶林具有第二小的CI平均值(CI=0.65),广泛分布在秦岭-淮河以南的南方山区,以及大兴安岭-太行山脉一线、昆仑山脉西段和藏东南、横断山脉等地,其中横断山脉部分地区出现异常低的CI值(CI<0.60),这可能是受到严重的地形影响。虽然本研究对CI值已经做了地形订正,但仍然难以完全消除崎岖地形的强烈影响。相对于其他植被类型,针叶林具有最小的CI符合实际情况,因为针叶林一束多针的针束构造造成叶片聚集现象更为明显。与针叶林相比,阔叶林的CI值明显

图1 中国区域2000~2013年生长季(4~9月)平均聚集度系数分布图(a)和GLC2000土地覆盖类型图(b)

Figure 1 Spatial distribution of clumping index averaged over the growing seasons (from April to September) from 2000 to 2013 in China (a) and GLC2000 land cover map of China (b)

较高,常绿阔叶林的CI值平均为0.68,主要分布在青藏高原以东秦岭-淮河以南的横断山脉、大巴山脉、巫山、武陵山、雪峰山、南岭、江南丘陵以及台湾、海南岛等岛屿;郁闭落叶阔叶林的CI值平均为0.75,主要分布在六盘山以东秦岭-淮河以北的我国北方广大山区;稀疏落叶阔叶林的CI值相对较小(CI=0.67),这是因为从大于树冠的景观尺度看,稀疏落叶阔叶林树冠之间存在大量空隙,其叶片聚集程度往往比郁闭阔叶林更为显著。常绿灌木林与落叶灌木林的CI值非常接近,分别为0.76和0.75,前者分布在北纬45°以南的中国广大地区,后者主要分布在北纬45°以北的大兴安岭、小兴安岭、阿尔泰山脉等地区。草地是我国北方干旱、半干旱地区以及青藏高原区的主要生态系统,草地的叶片空间分布通常被假定为随机分布(CI值接近1),本研究也证实了草地在各类植被类

型中具有最大的CI值(大多在0.8以上),特别是内蒙古高原、鄂尔多斯高原、科尔沁草原的CI值大多在0.85以上(图1(a)红色区域).农田生态系统也具有较大的CI均值(CI=0.77),但其变化范围较大(0.7~1.0),如东北平原耕地CI均值变化较大(图1(a)中浅绿色\黄色\橙色\红色区域)、华北平原耕地CI值相对均匀(图1(a)黄色\橙色区域).一般而言,封陇前的行播作物的植株结构明显、叶片聚集程度高导致CI值较小,封陇后的行播作物相对均一,CI值通常较大.中国幅员辽阔,不同耕作区的作物种类、耕作制度的差异明显也可能造成耕地CI变化范围较大.由于天气原因,长江中下游平原和四川盆地耕地的高质量的有效像元缺少较多.

2.2 时间变化特征

(i) 年内变化特征. 由于缺少可用的CI产品,很多陆表模型通常假定CI为常数而忽略其季相变化^[34].图2显示我国8种主要植被类型的2000~2013年各期(每8天1期,1年共46期)多年CI平均值的季相变化.从图2可以看出,所有植被类型的CI都有明显的季相变化,总体而言,春季随着叶子增密增厚导致CI值逐渐变小,6~7月达到最低值,即叶片聚集程度最明显,进入秋季以后,随着叶子逐渐凋落变得稀疏,CI值又开始变大,叶片聚集程度降低,这过程与野外实测CI的季相变化基本相符^[20].不同植被类型CI季相变化的时间与程度具有明显的差别.落叶针叶林CI季相变化呈现明显的U型形状,随春季新叶生长,CI从第65天的0.73逐渐下降到第129天的0.64,从第129天到第291天的生长季都保持稳定的最小CI值(0.64~0.63),进入秋季后,随针叶的凋落,CI值逐渐上升,冬季CI值达到最大(0.72~0.76).落叶针叶林CI季相变化符合实际情况,也就是夏季针叶浓密,叶片聚集程度高;冬季由于针叶掉落变稀,叶片聚集程度低.常绿阔叶林和常绿针叶林由于具有比较稳定的冠层结构,全年CI变化范围较小,分别为0.64~0.70和0.62~0.66,两者在6月具有全年最低的CI值,季相变化趋势大体一致,但后者的变化幅度更小.相对于常绿乔木林,常绿灌木林具有更大的CI值(0.73~0.80),这是因为常绿灌木林LAI相对常绿乔木林小,其叶片聚集程度不如常绿乔木林明显.常绿林CI也有较明显的季相变化,这与前人的研究成果相类似,其主要原因是常绿林在冬半季也会发生部分的掉叶、

图2 中国区域8种主要植被类型2000~2013年各期平均聚集度系数的季相变化

Figure 2 Seasonal trajectories of mean clumping index from 2000 to 2013 for 8 dominant cover types in China

掉针等物候现象^[19,20,35].郁闭落叶阔叶林的CI呈现更明显的季相变化,其全年变化范围较大(0.72~0.81),最小值出现在6~7月.草地、稀疏草地或灌木全年CI相对较高,草地生长季CI变化范围较小(0.76~0.81),稀疏草地或灌木生长季CI具有最小的变化范围(0.79~0.83),这与草地在所有植被中叶片分布最随机的事实相符.耕地CI季相变化较为显著,其全年变化范围为0.72~0.82,反映了农业生产具有强烈的季节性.虽然本文提取的CI能够捕捉到植被结构的季节变化,但是除了落叶针叶林外,其他植被类型CI都在初春和秋末出现程度不一的异常低值,He等人^[17]用MODIS数据反演的CI季节变化也发现这种现象,并认为是噪声的影响.本研究认为还可能由于全国各地植被物候关键期的开始与结束日期差异巨大造成的.另外原因是CI反演算法自身的限制,即NDHD适用于提取覆盖度大于25%的植被CI^[13],但是冬半季植被由于缺少足够的叶子覆盖有可能导致覆盖度低于25%,造成冬半季CI可能带有较大的误差,因此本文提取的4~9月平均CI具有相对可靠的质量.

(ii) 年际变化特征. 图3显示2000~2013年中国区域8种主要植被类型生长季(4~9月)平均CI的年际变化,就各种植被类型生长季CI的多年平均值而言,稀疏草地或灌木>草地>耕地>常绿灌木林>落叶阔叶林>常绿阔叶林>常绿针叶林>落叶针叶林,这与图2显示的结果一致.从图3可以看出,每种植被类型的

图3 中国区域8种主要植被类型生长季(4~9月)平均聚集度系数的年际变化

Figure 3 Annual variations of clumping index averaged over the growing seasons (from April to September) for 8 dominant cover types in China

各年CI生长季均值相对稳定, CI年际变化并不明显, 即使CI年际变化相对较大的落叶阔叶林、常绿阔叶林与耕地也都小于0.04, 这是因为全国生长季平均值平滑了不同区域的年际变化。除了草地、稀疏草地或灌木外, 2008年各种地表覆盖类型CI都有所增大, 这可能与2008年极端天气气候事件有关。2008年1月10日~2月2日我国南方地区发生了百年一遇的低温雨雪冰冻灾害^[36], 本文选择受灾最严重的安徽、湖北、湖南、江西、广西、贵州6省区, 考察CI对2008年南方雪灾的响应。图4显示6省区6种主要植被类型2008年2月平均CI与其他年份2月平均CI的对比(2000年2月无MODIS数据), 可以看出, 2008年2月各种植被类型CI值都有明显的增加, 特别是落叶阔叶林和耕地的CI值比其他年份的平均值增加0.1以上。CI的增加代表植被三维结构变得不显著, 这可能是因为受灾地区的植被生态系统遭到了严重破坏, 大片植被掉叶、倒伏、毁坏甚至死亡引起的。

2.3 CI与温度和降水的相关性分析

图5显示2000~2013年中国区域年均CI与年均温度和年均降水量的相关系数, 图中只计算至少有10年以上有效CI值像元的相关系数。总体而言, CI与温度的相关性并不明显, 内蒙古、西北、青藏高原等草地和西南地区的年均CI与年均温度大多呈现正的低度相关(0.3~0.5)或中度相关(0.5~0.8), 东北平原、华

图4 2008年2月中国南方雪灾严重地区6种主要植被类型聚集度系数的变化

Figure 4 Feedback of clumping index of 6 dominant cover types on the South China snow disaster in February 2008

北平原和长江中下游平原部分地区的年均CI与年均温度呈现负的低度相关(-0.3~-0.5)或中度相关(-0.5~-0.8)。CI与降水量的相关性比CI与温度的相关性稍强, 表现为北方地区森林的年均CI与年均降水量呈现较为明显的正低度相关或中度相关, 北方地区草地与耕地和西南地区的年均CI与年均降水量呈现负低度相关或中度相关, 这说明降水是北方干旱半干旱地区植被生长的敏感因子。另外可以看出, 温度和降水量对上述地区CI的影响方向刚好相反。由于CI表征植被叶片的聚集或分散程度, 并不完全反映植被长势, 因此CI与温度和降水量的关系比较复杂, 这或许是它们相关性不明显的原因。

3 结论与讨论

叶片聚集度系数是一个重要的植被结构参数, 表征了植被冠层叶片的空间分布特征, 多角度遥感技术的发展使得在大面积上连续获取聚集度系数成为可能。本文利用MODIS BRDF产品数据提取了2000~2013年中国区域每8天的500 m分辨率CI, 并分析了其时空分布特征。研究结果表明CI在空间分布上具有明显的地域差异, 而且与地表覆盖类型密切相关, 落叶针叶林和常绿针叶林具有最小的CI, 常绿阔叶林、落叶阔叶林和常绿灌木林次之, 耕地和草地具有较高的CI。各种植被类型CI具有明显的季相变化, 但不同植被类型CI季相表现差别较大。CI能够反

图5 2000~2013年中国区域年均聚集度系数与年均温度(a)和年均降水量(b)的相关系数

Figure 5 Correlation coefficient between annual average clumping index and annual average temperature (a) and annual average precipitation (b) in China from 2000 to 2013

映极端天气气候事件对植被结构的影响,但与年均温度和年均降水量相关性不显著.

基于MODIS数据提取的CI能够反映不同植被类型集聚度系数的时空变化特征,对于提高我国生态、水文、气候及其他地表过程模型的模拟精度具有重要意义,但反演结果还受到以下多种因素的影响.(1)基于NDHD指数提取CI需要可靠的“热点”和“暗点”反射率,由于MODIS传感器设计限制,无法观测到“热点”与“暗点”反射率,只能通过BRDF核驱动模型外推出这种特征角度的反射率,这需要高质量的BRDF产品数据.虽然MODIS BRDF时间分辨率较高

(8 d),但是苛刻的质量要求造成MODIS反演的CI难以完整覆盖,有些地方甚至用多年数据都覆盖不全.(2) NDHD-CI经验关系受到太阳天顶角和植被覆盖度的影响,利用当地当期的实际太阳天顶角计算NDHD可以提高反演精度,植被覆盖度大于25%的反演条件可能造成稀疏植被或部分冬季地表覆盖的CI反演结果误差较大.(3) 地表覆盖类型图的分类精度和空间分辨率直接影响反演结果,特别是对针叶林反演结果影响较大.(4) 崎岖地形会造成CI反演值偏小,需要对复杂地形的反射率做准确的地形校正.这些问题也是将来改进CI反演精度需要解决的问题.

致谢 NASA LPDAAC数据中心提供MCD43A1和MCD43A2数据,南京信息工程大学柳艺博博士提供2000~2013年年均气温和年均降水量数据,在此一并表示感谢.

参考文献

- 1 Nilson T. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agric For Meteorol*, 1971, 8: 25–38
- 2 Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant Cell Environ*, 1992, 15: 421–429
- 3 Chen J M, Black T A, Adams R S. Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand. *Agric For Meteorol*, 1991, 56: 129–143
- 4 Leblanc S G, Chen J M. A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements. *Agric For Meteorol*, 2001, 110: 125–139
- 5 Chen J M, Mo G, Pisek J, et al. Effects of foliage clumping on the estimation of global terrestrial gross primary productivity. *Glob Biogeochem Cycle*, 2012, 26: GB1019, doi: 10.1029/2010GB003996
- 6 Roujean J L, Leroy M, Deschamps P Y. A bi-directional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. *J Geophys Res*, 1992, 97: 20455–20468

- 7 Sandmeier S, Deering D W. Structure analysis and classification of boreal forests using airborne hyperspectral BRDF data from ASAS. *Remote Sens Environ*, 1999, 69: 281–295
- 8 Pinty B, Widlowski J L, Gobron N, et al. Uniqueness of multiangular measurements-Part I: An indicator of subpixel surface heterogeneity from MISR. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2002, 40: 1560–1573
- 9 Gao F, Schaaf C B, Strahler A H, et al. Detecting vegetation structure using a kernel-based BRDF model. *Remote Sens Environ*, 2003, 86: 198–205
- 10 Roujean J L, Lacaze R. A global mapping of vegetation parameters from POLDER multi-angular measurements for surface-atmosphere interaction studies: A pragmatic approach and its validation. *J Geophys Res*, 2002, 107: 1029–1042
- 11 Chen J M, Liu J, Leblanc S G, et al. Utility of multiangle remote sensing for terrestrial carbon cycle modeling. In: *Proceedings of the Symposium on physical Signatures and Measurements in Remote Sensing*, Toulouse, France: CNES, 2011. 249–260
- 12 Chen J M, Liu J, Leblanc S G, et al. Multi-angular optical remote sensing for assessing vegetation structure and carbon absorption. *Remote Sens Environ*, 2003, 84: 516–525
- 13 Chen J M, Menges C H, Leblanc S G. Global mapping of foliage clumping index using multi-angular satellite data. *Remote Sens Environ*, 2005, 97: 447–457
- 14 Leblanc S G, Chen J M, White H P, et al. Canadawide foliage clumping index mapping from multi-angular POLDER measurements. *Can J Remote Sens*, 2005, 31: 364–376
- 15 Pisek J, Chen J M, Lacaze R, et al. Expanding global mapping of foliage clumping index with multi-angular POLDER 3 measurements: Evaluation and topographic compensation. *ISPRS-J Photogram Remote Sens*, 2010, 65: 341–346
- 16 Hill M J, Román M O, Schaaf C B, et al. Characterizing vegetation cover in global savannas with an annual foliage clumping index derived from the MODIS BRDF product. *Remote Sens Environ*, 2011, 115: 2008–2024
- 17 He L, Chen J M, Pisek J, et al. Global clumping index map derived from the MODIS BRDF product. *Remote Sens Environ*, 2012, 119: 118–130
- 18 Zhu G, Ju W, Chen J M, et al. Foliage clumping index over China's landmass retrieved from the MODIS BRDF parameters product. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2012, 50: 2122–2137
- 19 Pisek J, Ryu Y, Sprintsin M, et al. Retrieving vegetation clumping index from Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) data at 275 m resolution. *Remote Sens Environ*, 2013, 138: 126–133
- 20 Pisek J, Govind A, Arndt S K, et al. Intercomparison of clumping index estimates from POLODER, MODIS, and MISR satellite data over reference sites. *ISPRS J-Photogram Remote Sens*, 2015, 101: 47–56
- 21 Jiao Z T. The Use of MODIS BRDF/Albedo Products to Recover Land Surface Properties (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Graduate School of Beijing Normal University, 2008. 13–14 [焦子铎. 利用 MODIS BRDF 和反照率产品进行地表特性的研究. 博士学位论文. 北京: 北京师范大学研究生院, 2008. 13–14]
- 22 Zou J. The Study on Ground-based LAI Measurements with Photography Method (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Graduate School of Beijing Normal University, 2009. 61–85 [邹杰. 基于摄影方法的地面叶面积指数测量研究. 博士学位论文. 北京: 北京师范大学研究生院, 2009. 61–85]
- 23 Xu X R. Remote Sensing Physics (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 2005. 81–83 [徐希孺. 遥感物理. 北京: 北京大学出版社, 2005. 81–83]
- 24 Ma Q M, Li J, Liu Q, et al. Mixed-pixel clumping index calculation and scale analysis. *J Remote Sens*, 2012, 16: 895–908
- 25 Yin G F, Liu Q H, Li J, et al. Effect of crown shape on the estimation of gap probability and leaf area index. *J Remote Sens*, 2014, 18: 752–759
- 26 Liu R, Chen J M, Liu J, et al. Application of a new leaf area index algorithm to China's landmass using MODIS data for carbon cycle research. *J Environ Manage*, 2007, 85: 649–658
- 27 Zhao C Y, Shen W H, Peng H H. Methods for determining canopy leaf area index of *piceacressifolia* forest in Qilian Mountains, China (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2009, 33: 860–869 [赵传燕, 沈卫华, 彭焕华. 祁连山区青海云杉林冠层叶面积指数的反演方法. 植物生态学报, 2009, 33: 860–869]
- 28 Liu Y, Wang J D, Zhou H M, et al. Upscaling approach for validation of LAI products derived from remote sensing observation. *J Remote Sens*, 2014, 18: 1189–1198
- 29 Schaaf C B, Gao F, Strahler A H, et al. First operational BRDF, albedo and nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sens Environ*, 2002, 83: 135–148
- 30 Chen J M, Cihlar J. A hotspot function in a simple bidirectional reflectance model for satellite applications. *J Geophys Res*, 1997, 102: 907–913

- 31 Zhu G L, Ju W M, Chen J M, et al. Validation of MODIS BRDF model parameters product and the Ross-Li model with POLDER data. *J Remote Sens*, 2011, 15: 875–894
- 32 Chen J M, Deng F, Chen M Z. Locally adjusted cubic-spline capping for reconstructing seasonal trajectories of a satellite-derived surface parameter. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2006, 44: 2230–2238
- 33 Liu Y B, Ju W M, Chen J M, et al. Spatial and temporal variations of forest LAI in China during 2000–2010. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 2846–2856
- 34 Baldocchi D D, Wilson K B, Gu L. How the environment, canopy structure and canopy physiological functioning influence carbon, water and energy fluxes of a temperate broadleaf deciduous forest: An assessment with the biophysical model CANOAK. *Tree Physiol*, 2002, 22: 1065–1077
- 35 Sprintsin M, Cohen S, Maseyk K, et al. Long term and seasonal courses of leaf area index in a semi-arid forest plantation. *Agric For Meteorol*, 2011, 151: 565–574
- 36 Bai Y, Zhang J S, Wang J A. A comparative study of snow disasters in northern and southern China: Taking freezing and snow disaster in 2008 and snowstorm disaster in 2009 as examples (in Chinese). *J Catastrophol*, 2011, 26: 14–19 [白媛, 张建松, 王静爱. 基于灾害系统的中国南北方雪灾对比研究: 以 2008 年南方冰冻雨雪灾害和 2009 年北方暴雪灾害为例. *灾害学*, 2011, 26: 14–19]

Spatial-temporal characteristics of foliage clumping index in China during 2000–2013

ZHU GaoLong

Department of Geography, Minjiang University, Fuzhou 350108, China

The distribution of natural vegetation foliage is often clumped at different scales of three-dimensional structures such as shoots, branches, whorls, tree crowns, and tree groups. Clumping index (CI) quantifies the level of foliage grouping relative to a random distribution in space. As an additional vegetation structural parameter of comparable importance to leaf area index (LAI), CI strongly influences canopy radiation regimes, photosynthesis and land-atmosphere interactions. It is a correction factor to convert the effective LAI which assumes a random distribution of leaves in space to the true LAI, and is also needed to separate the canopy into sunlit and shaded leaves for accurate simulations of process-based ecological and land surface models. However, due to the lack of clumping index available, clumping index values are often assumed to vary only with land cover types in most operational LAI retrieval algorithms and ecological models, which might induce large uncertainties in these model outputs. Therefore, it is highly desirable to map the spatial and temporal variations of the clumping for different land cover types.

The bidirectional reflectance distribution function (BRDF) provides the anisotropic nature of surface scattering including both the spectral and angular signatures, which can be used to retrieve structural information of vegetated surfaces. In this paper, based on the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) BRDF parameters product, a modified RossThick-LiSparseReciprocal model was used to simulate the reflectance at hotspot (the solar zenith angle was set as 45° , and the relative azimuth angle between the sun and sensor was 0°) and darkspot (the solar zenith angle was set as 45° , while the relative azimuth angle was 180°) in the near infrared band, which was then used to calculate the angular index named normalized difference between hotspot and darkspot (NDHD). With the relationship between CI and NDHD simulated by the 4-Scale geometrical model, the clumping index over China at 500 m resolution was retrieved every 8 days during the period from 2000 to 2013. The effect of topography on the retrieved CI was corrected using a topographic compensation function calculated from the digital elevation model at 90 m resolution. A locally adjusted cubic-spline capping method was used to remove the noises in the seasonal trajectory of CI. Then, the spatial and temporal variations of clumping index in China and its relationships with temperature and precipitation were analyzed.

Results show that there is obvious difference in the dimensional distribution of CI which closely relates to the land cover types. Among all cover types, the needle-leaved deciduous forests and the needle-leaved evergreen forests have the smallest mean CI (CI are equal to 0.63 and 0.65, respectively) during the growing seasons (from April to September) from 2000 to 2013 in China, indicating the most clumped canopy structure of coniferous forests. The broad-leaved evergreen forests have the second smallest mean CI (CI=0.68), followed by the broad-leaved deciduous forests (CI=0.75), and the shrub evergreen forests (CI=0.76). On average, grasslands and croplands have the highest CI (least clumped). All cover types have smaller CI values in mid-summer than in other seasons due to the fact that the canopy becomes denser after the spring growth, but the CI seasonal trajectories driven by site/species phenology are quite distinct for different land cover types. MODIS CI can reflect the influence of extreme weather and climate events on the vegetation structure, but the correlation between CI and annual average temperature or annual average precipitation is not significant. MODIS CI can effectively capture the spatial-temporal pattern of the structural difference among land cover types, and provide more reasonably accurate and up-to-date vegetation structure information used in the modeling of terrestrial energy, water, and carbon cycle processes, particularly in heterogeneous vegetated areas.

clumping index, temporal and spatial variation, multi-angle remote sensing, MODIS, NDHD

doi: 10.1360/N972015-00987