遥感在林冠动态监测研究中的应用

郭志华 肖文发 蒋有绪

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘要 林冠动态大致包括三方面的内容, 即由病虫害、林火等引起的林冠变化、由大风等灾害引起的林隙动态、以及树冠和林冠的正常变化等。遥感在林冠动态研究中的地位和作用已被广泛认知, 国内外在此方面的研究已积累了丰富的经验。进行林冠动态研究所利用的遥感数据主要有 Landsat TM 卫星数据及各类航空遥感数据。卫星遥感数据与航空遥感数据具有各自的优势与不足。数据类型不同, 研究的重点及研究方法也不尽相同。在较大尺度上, 卫星遥感数据适合于研究林隙动态以及由病虫害等引起的林冠变化; 而在较小尺度上, 航空遥感数据更适于深入研究林隙动态、树冠变化和林冠的变化等。目前, 具有高重复性和一致性的高分辨率多光谱数字正射航空影像在林冠动态研究中占据重要地位。随着更高分辨率资源卫星的相继升空, 卫星遥感将在林冠动态研究中占据越来越重要的地位。过去的研究主要集中在林冠动态的检测与监测方面, 未来的工作将更侧重于林冠动态的机理研究。

关键词 林冠动态 遥感 监测

APPLICATIONS OF REMOTE SENSING TO MONITORING FOREST CANOPY DYNAMICS

GUO Zhi-Hua XIAO Wen-Fa and JIANG You-Xu

(Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, the Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract Canopy dynamics are important in understanding the mechanisms regulating forest production and transition, and maintenance of forest biodiversity. The canopy is the place where important physiological processes such as photosynthesis, respiration, and transpiration occur, and it affects the primary forest production. Canopy dynamics include 3 types of changes: canopy changes caused by insect infestations, diseases, fires, and others; gap dynamics caused by strong winds like typhoons or hurricanes, landslides, floods, volcano eruptions, fires, and other disasters; and the normal changes of tree crowns and the forest canopy. Gradually, the role of remote sensing in detecting, monitoring and assessing forest canopy dynamics has become well established and both the advantages and disadvantages of this approach are widely understood. There are many publications in China and abroad regarding this research field. This paper has reviewed studies in applying remote sensing in the field of canopy dynamics in China and abroad up to the current date. It has looked into the different research emphases that each researcher selected, the methodologies they used, and the advantages and disadvantages involved. It tries to derive some useful suggestions for future research in this field. In summary, the remote sensing data used for canopy dynamics can be divided into two types: one is the satellite remote sensing data such as TM, MSS, and SPOT HRV, the other is aerial remote sensing data. Each of these two kinds of data has its respective advantages and disadvantages. Different data can be used to satisfy different research emphases and different methods and techniques are required accordingly. Satellite data can be used in measuring gap dynamics and canopy changes due to diseases, insects and fires in a large scale. Airborne remote sensing data can be used in monitoring the changes of individual trees, gaps and canopies in a finer scale. In recent years, highly reproducible and consistent orthorectified aerial photographs, in a digital format, have played a very important role in detecting and monitoring changes of tree crowns and the forest canopy. The higher resolution satellite remote sensing data, which will be available soon, would be more suitable for detecting and monitoring canopy dynamics. The existing studies have emphasized the mapping and monitoring of forest canopy, and the mechanism of canopy dynamics will be paid more attention to in the future since such research will provide more in-depth information in modeling the forest growth, forest production, and forest biodiversity.

Key words Canopy dynamics, Remote sensing, Monitoring

收稿日期: 2002-11-04 接受日期: 2003-06-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目(2002CB111504)、国家自然科学基金重大研究计划面上项目(90211006)和国家林业局重点实验室基金

E-mail: guozh@fee.forestry.ac.cn; guo-zhi-hua@yahoo.com

林冠动态是森林生态学研究的一项重要内容，同时也倍受森林经营者关注。自然因子引起的林冠动态主要包括由病虫害、林火、干旱等引起的较大面积的林冠变化、由大风等灾害引起的林隙动态、以及树冠和林冠的正常变化等几方面内容。对林冠动态的研究有利于加深对森林群落演替规律的认识，同时可为森林经营提供理论基础。

传统上对林冠(特别是单棵树)变化的研究,主要依赖于那些连续观测了几十年的永久样地(Cameron *et al.*, 2000)。如今,遥感监测技术已证明了其在中小尺度上监测和区分林冠动态变化的巨大潜力(Coppin & Bauer, 1994)。

近年来,随着遥感技术和计算机软、硬件技术的发展与完善,利用遥感数据所进行的生态学研究已经深入到生态学的许多领域、取得了丰硕的研究成

果,并将继续在区域和全球尺度上的生态学研究起着极为重要的作用(彭少麟等, 1999; 2000; 郭志华等, 1999; 2001a; 2001b)。目前,有关国外利用遥感技术对林冠动态的研究文献已越来越多,研究内容也越来越深入,国内类似研究相对较少。本文主要介绍国外在此领域的研究状况与进展。

1 林冠动态研究的遥感平台选择

根据传感器的运载平台不同,可将用于研究林冠动态的遥感数据分为卫星遥感数据和航空、地面遥感数据等类型。卫星遥感数据主要在中、大尺度上研究林冠动态,而航空和地面遥感数据主要在小尺度上研究林冠动态。目前,主要用于研究林冠反射光谱的遥感平台及其评述见表 1。

表 1 林冠反射光谱的遥感平台(引自 Blackburn 和 Milton, 1997)
Table 1 Platforms for remote sensing forest canopy spectral reflectance (from Blackburn & Milton, 1997)

平台 Platform	评述 Comments
手持式、梯子或柱子 Hand-held, ladder, or mast	主要用于灌丛冠层和树枝等 Useful for shrub canopies and for tree canopy component(branches, etc.)
高塔 Tower	虽存在冠层干扰和空间取样问题,但为直接和重复观测提供了稳定平台 Problems of canopy disturbance and spatial sampling but provides a stable platform for directional measurements and repeated observations(e.g., seasonal trends in reflectance)
缆车索道 Tramway	可以测量不受干扰的林冠区域,对偏离天底的测量有用 Allows access to undisturbed areas of the canopy and may be used for off-nadir measurements
车载升降平台 Cherry-picker	在那些有经营活动的森林中有用 Practical difficulties with access away from logging roads etc. but useful in some managed forests
固定气球 Tethered balloon	比上述平台的高度更高,但因树枝的影响而缺少机动性;需多人实地操作 Extended height range compared with the above, but limited mobility due to tether lines fouling on branches, etc.; requires a team of several people to operate and on-site storage may be required
飞艇 Airship	一个低震动的平台,可以慢速通过或停于林冠上方;可以在 2 500 m 高空使用大型和(或)重型的传感器阵列 Low-vibration platforms which may be flown slowly or positioned over an area of forest for extended periods; large and/or heavy sensor arrays may be used at heights up to 2 500 m
遥控飞机 Remotely piloted aircraft(RPA)	高度可达同温层或仅在林冠上方,但 RPA 必需在视野之内 Some with stratospheric capabilities; others which could be used at lower altitudes over forests; the need to keep simple RPAs within visual range limits their application over forest
超轻型飞机 Ultralight aircraft	最近的产品配备了小型传感器阵列,没有直升机和轻型飞机稳定;操作成本低;可慢速和低空飞行 A recent development well-suited to carrying arrays of small sensors over forest; less stable than helicopter and light aircraft, but lower operating costs and often able to remain on standby close to the site of interest; able to fly low and slow
直升机 Helicopter	在林冠上空直接观测反射值的很好的平台;在林冠上空的多高度观测时特别方便;能携带大型、重型传感器如成像光谱仪和扫描仪;费用高 3D maneuverability make them excellent platforms for directional reflectance measurements over forests; especially convenient for multi-height measurements over the same area of canopy; able to carry large, heavy sensors such as imaging spectrometers and scanners; expensive to hire
轻型飞机 Light aircraft	可用于短时间内获得中等大小区域的数据 Widely available and well-suited to gathering data over moderately large areas at short notice
卫星 Satellite	可用于中等及更大尺度的林冠动态研究,但分辨率低,且受天气等的限制 Useful for the large areas of forest canopy, but limited to low resolution and bad weather and etc.

2 卫星遥感

在利用卫星遥感进行林冠动态研究时, 主要利用的是 Landsat 卫星数据。早期主要利用 Landsat MSS 数据(地面分辨率 80 m)(Nelson, 1983; Williams *et al.*, 1985), 后来主要利用 TM 数据(地面分辨率 30 m)。随着载有更高分辨率传感器卫星的相继升空(如 QuickBird, IKONOS, SPOT5 等), 高分辨率多光谱卫星数据将进一步推动在林冠动态的遥感检测、监测、评价及对比分析等方面的应用研究。

引起林冠变化的因素很多(Coppin & Bauer, 1994)。目前, 利用 TM 数据所进行的林冠动态的研究主要集中在由林火、病虫害、风倒等引起的林冠变化方面, 也有一些涉及干旱等因素引起的林冠变化。林火是森林生态系统中的重要生态因子之一, 关于林火的遥感检测、监测与影响评价将另文综述。

引起林冠变化的因子不同, 其遥感检测、监测的方法也不相同。

2.1 由病虫害引起的林冠变化

已有许多研究利用多时相卫星数据来提取或检测森林受损面积。Nelson(1983)和 Williams 等(1985)很早就利用 MSS 数据来检测由病虫害引起的林冠变化。

由于比值植被指数 $RVI(TM4/TM3)$ 的比值既可以增加绿色植被的亮度, 也可减少地形坡度的影响, 同时 RVI 与绿叶生物量成正比(Spanner *et al.*, 1990), 因此 RVI 是很有用的植被指数, 常被用来检测森林健康状况。当森林失叶时, 绿叶生物量减少, 导致 RVI 降低(Leckie & Ostaff, 1988; Ekstrand, 1990; Brockhaus *et al.*, 1992; Franklin & Raske, 1994)。

利用遥感数据来检测林冠变化及森林病虫害的方法主要有两种: 一是影像分类, 一是图像差值(Royle & Lathrop, 1997)。Royle & Lathrop(1997)利用图像差值(既两景影像 RVI 的差)技术, 根据 TM 数据(1984 年 11 月 8 日和 1994 年 11 月 4 日)来检测新泽西高地上的加拿大铁杉(*Tsuga canadensis*)林因虫害而引起的失叶(Defoliation)状况, 并在 1 267 km² 的面积上对失叶量进行了定量分析和制图。他们应用了多种处理技术来消除与植被变化无关的光谱差异, 首先将图象亮度值转换为辐射值来校正波段间的差异, 再利用了高亮、高暗目标(如裸露岩石和深水水库等)来归一化两年的卫星影像以消除其余与植被变化无关的波谱差异, 最后利用比值植被指数 RVI 来检测森林健康状况。

后来, Radeloff 等(1999)首次使用波谱混合分析技术、并充分利用害虫种群数据, 来提高对贾克松色卷蛾(*Choristoneura pinus*)引起的松树(*Pinus banksiana*)林失叶量的检测精度。方法是: 利用虫害爆发前的 TM 数据(1987 年)来确定林地特征, 然后再分析爆发高峰期的 TM 数据来检测松树失叶及其与其它生态因子的关系。具体步骤: 1) 用 5S 算法对参考卫星遥感数据(1993 年 8 月 1 日的 TM 影像, 1993 年为色卷蛾的爆发高峰期)进行辐射校正。2) 将其它两景(1987 年和 1992 年)TM 数据辐射匹配到 1993 年的参考影像, 即选择无辐射变化的地物(如湖泊、机场和城市中心等)获得相关直线来进行匹配。3) 在 33 个随机样地上调查色卷蛾种群数据。并在卫星影像上定义含有色卷蛾的均一样地, 测定 1987 年和 1993 年的卫星影像的反射率, 然后建立两时期反射率的差值与色卷蛾种群数据的相关关系。4) 区分混有阔叶树的松林和纯松林立地。5) 进行波谱混合分析。结果发现: 失叶的林地在近红外反射率 NIR 和中红外反射率 MIR 增加, TM4 平均增加了 5%, 但 NIR 与色卷蛾数量成负相关, 这主要是因为松林中的阔叶树种增加了 NIR 反射率、同时限制了色卷蛾种群; 混交松林和纯松林之间在 NIR 上相差 10%; 波谱混合分析证明了 1993 年的绿色针叶量与色卷蛾种群数据之间呈负相关。之后, Radeloff 等(2000)还利用 TM 数据研究了由于色卷蛾导致的松树失叶与抢救性砍伐对景观格局的影响。

2.2 由风倒等形成的林隙动态

林隙在物种分布、森林演替、生物多样性的维持和森林经营等方面具有重要作用(Blackburn & Milton, 1997; 臧润国等, 1999; Hubbell *et al.*, 1999; Schnitzer & Carson, 2001)。耐荫性不同的物种所要求的最适林隙的大小不同, 林隙生成和闭合的速度也影响着物种多度(Tanaka & Nakashizuka, 1997)。林隙主要由自然和人为干扰所形成。自然干扰早就被认为是影响森林群落动态和结构的一个重要因子(White, 1979; Pickett & White, 1985; Blackburn & Milton, 1997)。干扰的大小与频率影响温带林和热带林的物种组成(Tanaka & Nakashizuka, 1997)。自然干扰的主要类型有: 洪水、大风、冻雨、林火、滑坡、火山喷发和病虫害等(臧润国等, 1999), 而由各种因子导致的树倒(Treefall)是温带和热带森林的一种重要干扰方式和树木更新的一个重要机遇(Nakashizuka, 1987)。并且, 树倒林隙(Treefall gap)可以维持森林的生物多样性(Hubbell *et al.*, 1999; Schnitzer &

Carson, 2001)。

在利用 TM 卫星数据进行的林隙动态研究中, 主要研究的因风力作用(如台风)而形成的林隙动态, 以 Mukai 和 Hasegawa(2000)的研究工作为典型代表。

1991 年 9 月, 在两周的时间里两个台风袭击了日本九州岛北部地区, 吹倒了很多人工林中的大树(主要是雪松和柏树)。利用台风前后的 TM 数据, Mukai 和 Hasegawa(2000)成功地提取了风倒林隙的面积。他们认为中红外波段的数据能更有效地检测风倒林隙。具体方法是: 参照台风后的航空影像, 将两景 TM 配准(Registered), 然后分析 TM1-5、TM7 和 *NDVI* 等由台风引起的变化特征。结果发现: 台风过境后, TM5、TM7 显著增加而 *NDVI* 降低, 因此 TM5、TM7 和 *NDVI* 等可被用来有效地检测台风影响。然后, 将两景 TM 数据的 TM5、TM7 和 *NDVI* 合成一个含 6 个波段的数据, 再用最大似然法对融合数据进行分类, 提取风倒林隙的面积。经航空影像数据的精度检验表明, 风倒林隙面积的提取精度达 90%。

总之, 利用卫星数据来研究林冠动态, 关键在于林冠光谱特征的提取。引起林冠变化的因子不同, 研究林冠动态所利用的光谱数据也不相同。如, Nelson(1983)利用 MSS 的波段 4 和波段 5 数据, Williams 等(1985)、Robed 和 Lopez(1995)则利用各波段的数据, Royle 和 Lathrop(1997)用近红外与红光波段的比值(TM4/TM3)来检测森林植被变化, Mukai 和 Hasegawa(2000)利用的是 TM5、TM7 和 *NDVI* 数据。

在利用多时相卫星数据来检测林冠变化时, Collins 和 Woodcock(1996)认为用主成分分析和 Kauth-Thomas 变换的方法比其它方法的效果好, 并找到了一个优化方法来监测由于干旱死亡而引起的林冠变化。Robed 和 Lopez(1995)还根据 TM 数据利用 PCA 分析来提取林火面积。

3 航空遥感

航空影像已被广泛用于研究林冠的长期动态。航空遥感比卫星遥感具有更大的灵活性和更高的分辨率, 渐渐地, 航空影像在森林制图、林业资源详查及其监测方面的地位和作用已经建立, 其优势和不足也被广泛认知(Howard, 1991)。航空遥感在林冠动态(特别是树冠动态)研究已越来越广, 目前国外基于遥感数据的林冠动态研究大多利用航空遥感手段。

3.1 树冠动态

传感器和图象处理技术的进步及 GIS 技术的发展, 已经可以利用遥感数据来研究生态系统的生态过程(Blackburn & Milton, 1997)及单个个体(Gougeon, 1995)。

单个树冠特征的自动提取可以利用高分辨率航空多光谱数字影像来实现, 即详细地描绘树冠轮廓和准确计算树冠数量。自动描述树冠的方法由两部分组成: 第一步, 利用 Valley-following 程序将树冠从背景植被中区分出来; 第二步, 使用 Rule-based approach 方法来一个个地准确描绘和区分单个树冠(Gougeon, 1995)。

最近, Herwitz 等(1998)利用 1:1 500 ~ 1:3 000 的航空立体像对, 以树冠投影面积作为研究单位来研究热带雨林的长期动态。他们将配准的航空影像放大到 1:335, 在透明的表格纸上跟踪树冠周长和大树枝分叉点(BIP), 用 AutoCAD 数字化和几何校正, 然后计算每个树冠的面积和周长。他们将树冠大小分为 6 个级别, 分析了热带雨林冠层树种树冠的长期增长、树冠大小与存活率之间的关系等。他们的研究表明: 冠层树种的死亡率、生长率与树冠大小无关。

近来, 随着技术进步, 数字正射航空影像的生成与应用越来越广, 该技术可以准确地叠加和对比分析不同时期的航空影像, 可以对每棵树的树冠进行制图。

Cameron 等(2000)对单棵树树冠变化的监测研究是应用数字正射航空影像的典型代表。他们首先制作不同时期的数字正射航空影像, 之后在每个时期的影像上判读和确定每棵树, 然后利用 GIS 对每棵树进行标记, 最后在此基础上分析林冠变化。

Herwitz 等(2000a)还利用 10 ~ 50 cm 分辨率的彩色和彩红外航空影像研究了加州一个自然保护区在 21 年期间 23 个树种的树冠投影面积的变化。方法是: 先扫描航空影像, 然后进行几何校正。几何校正又分为高分辨率法(HRM)和低分辨率法(LRM)。HRM 和 LRM 的主要不同点在于两者的扫描分辨率不同, 但 LRM 法与 HRM 法所利用的 GCP 相同。具体方法是: 先扫描航空影像, 再对每幅影像进行正射投影变换以校正相机镜头扭曲、航空器倾斜及地面高度差异(用精度为 5 m 的 DTM 来选择 GCP 进行校正), 然后数字化每个树冠, 最后进行分析。

3.2 由病虫害引起的林冠变化

早在 20 世纪 50 年代, 人们就利用航空遥感来

评估森林虫害导致的林冠变化 (Aldrich *et al.*, 1958)。

在航空遥感数据中,彩色红外(CIR)航空影像是检测森林病虫害导致林冠变化的主要数据源,其中, Everitt 等 (1999) 在该领域的研究成绩斐然。他们先通过地面实地调查,对健康树、病树和死树进行了反射光谱测定,在离地面的不同高度获得了研究区不同分辨率的航空数字 CIR 影像和航空像片。结果表明,健康树、病树和死树的叶片在绿光、红光和近红外光谱段都有显著差异 ($p < 0.05$)。健康树在红光和绿光谱段的反射率显著低于病树和死树,死树在这些谱段的反射率最高;而在近红外谱段,健康树的反射率显著高于病树和死树,死树的反射率最低。基于此,他们利用机载数字成像技术有效地检测了发生在德州中部的由橡树枯萎病引起的林冠变化 (Everitt *et al.*, 1999)。

在芬兰,由于云杉林的失叶没有中欧严重,所以不能用卫星影像来有效地估算失叶量,所以 Haara 和 Nevalainen (2002) 就利用 CIR 来评估芬兰云杉林由于虫害导致的林冠变化。方法是:先在研究区样地内,调查每棵树的位置(用准距仪测定树的坐标,精度 1mm)、每棵树的种类及其失叶的级别(共 5 级);将研究区两个年份相同生长季的 CIR 航空影像进行红、绿、兰扫描,再利用 DEM 进行正射校正,正射影像的空间分辨率约为 25 cm;利用分段 (Segmentation) 法在航空影像上将每棵树进行分段和识别;然后将每棵树进行分类(共 7 类),并用 Kappa 统计来检验分类精度;在对样地的失叶量级别进行分类后,利用 NDVI 和监督分类的方法对整个研究区进行分类。结果表明:该方法完全可以检测死的或严重失叶的单株树木和立地。

当然,数字近红外航空影像也可用于检测森林病虫害引起的林冠变化。美国德州的柑橘园常发生由 *Phytophthora parasitica* 引起的根腐病,给种植者带来损失。该病的主要症状是叶黄、冠层落叶和小枝枯死等。传统的根腐病地面调查需要大量人力物力,并且还可能漏掉一些病树。Fletcher 等 (2001) 首先在野外研究了健康树和病树的反射光谱特征,结果发现:健康树和病树在绿光和红光光谱段的反射率无显著差异 ($p < 0.05$) (与 Everitt 等 (1999) 的研究结果不同),而在近红外谱段的发射率则有显著差异 ($p < 0.05$),病树树叶在近红外谱段的反射率显著降低。基于此,他们利用机载彩色近红外数字影像有效地检测了柑橘林因病害引起的林冠变化。

3.3 林隙及其动态

林隙具有重要的生态学作用,其空间特征影响着植被的更新过程、生物多样性和物种分布 (Blackburn & Milton, 1997)。

Nakashizuka 等 (1995) 提出一个用航空遥感来研究温带森林冠层结构的新方法,即:将落叶林生叶与落叶时的航空影像数字高程模型的差作为林冠高度来分析冠层动态。该法为在较大时空尺度上准确、定量地研究冠层结构、林隙动态、及进一步研究群落演替等开创了一条崭新途径,具有广阔的应用前途。

Tanaka 和 Nakashizuka (1997) 为了更好地理解冠层结构及其时间变化、检验林隙形成的时空变化等,将 Nakashizuka 等 (1995) 的方法作了进一步优化,并将其用于研究日本中部温带落叶林的长达 15 年的林冠动态,对林冠高度的时空分布、林隙 ($\geq 5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 大小) 的时空分布及林隙的形成与闭合 (Closure) 进行了深入、细致的分析。具体方法是:利用 1976 ~ 1991 年间每 5 年的夏季的航空影像生成冠层表面数字高程模型 (Digital elevation models of canopy surface), 地表数字高程模型由 1991 年冬季的航空影像生成;冠层表面与地表的高程差就是冠层高度,然后利用植被剖面技术 (Vegetation profile technique (Hubbell & Foster, 1986)) 来定量地分析林冠动态。结果表明:新老林隙的大小分布服从一个幂函数模型;虽然在整个研究时期林隙的生成与闭合大致平衡,但在观测期内还是有很大的时间变化;新林隙显著偏向老林隙边缘,重复生成林隙的概率也很高;基于转移概率矩阵所分析的林冠高度剖面变化,表明该林分处于稳定状态 (图 1)。

上述研究的关键在于冠层和地面的数字高程模型的准确获取。Tanaka 和 Nakashizuka (1997) 的方法是:根据已知点的高程,利用立体像对来计算每个点的高程。总之,利用此法估计的冠层高度与地面观测数据有很好的-致性。林隙面积越大,越容易被检测,面积大于 100 m^2 的林隙有 93% 可以被检测到。

此外,Blackburn 和 Milton (1997) 利用航空遥感影像(地面分辨率 2 m)来研究英国一落叶林林隙和林冠的空间特征,如林隙的大小、形状、多度 (Abundance)、林隙间隔 (Gap spacing) (包括最近距离和分散度指数 Dispersion index)、冠层破碎化指数 (Fragmentation index)、内部冠层百分比 (Percentage of interior canopy) 及边缘生境量 (Amount of edge habitat) 等。

图1 Tanaka 和 Nakashizuka(1997)的研究技术路线
Fig.1 Steps to study canopy dynamics (Tanaka & Nakashizuka, 1997)

3.4 林冠动态机理

利用航空遥感数据可以研究林冠动态的机理。Herwitz 等(2000b)利用航空遥感数据研究了热带雨林在 18 年时间里冠层树种的存活与林冠面积动态,以探讨林冠长期动态与太阳辐射的关系等。其方法是:在一个非赤道的热带雨林(澳大利亚昆士兰州)中,利用大比例尺(1:1 500 ~ 1:3 000)的彩色航空立体像对(1974 年),用基于太阳位置的函数来模拟相邻树冠间直接辐射的侧面阴影;利用模型,计算每棵树在一年内每小时在其投影面积上所截获的直接辐射;然后利用 1994 年的航空影像来评估各棵树在年截获直接辐射(I_b)间的差异及侧面阴影对存活的影响,以确定冠层树种的死亡率、存活率及林冠动态变化(图 2)。结果表明:存活的冠层乔木与死亡的冠层乔木在 I_b 上有显著差异,那些截获了最多直接辐射的乔木的死亡率更低、树冠面积的变化(增加或减少)更大。并得出结论:这种侧面阴影的影响并不仅局限于树倒林隙的边缘,并且树冠位置的侧面阴影对相邻树木有可以检测到的长期影响。他们的研究证明:热带雨林冠层的优势种比附近遮荫的个体可以截获更多的直接辐射和具有更大的树冠增长能力。

利用多时相航空遥感进行林冠动态的研究,关键在于不同时期遥感影像之间的配准。Herwitz 等

(1998)所采用的方法充分体现了人类智慧。在 1994 年进行航空影像时,他们事先在研究区内安装了一些航空标识,利用这些标识及落叶期间或可见的大树枝分叉点(BIP)作为航空影像的 GCP,对 1994 年影像进行几何校正。然后,利用这些 BIP 作为 GCP,将 1976 年的航空影像与 1994 年的影像进行配准。

此外,地面成像也可被用于定量监测林冠动态。当影像位置、相机/目标方向以及成像时间与日期被仔细处理后,地面影像可以被成功地用来区分冠层光谱特征及其变化(Clays & Marsh, 1997)。Clays 和 Marsh (2001)最近的研究还表明,可以利用高重复性和一致性的光谱数据来定量监测林冠状况及反映自然或人为干扰对林冠的影响。

4 遥感在林冠动态监测研究中的局限

遥感应用研究的所有局限都存在于林冠动态的遥感监测领域。此外,林冠动态的遥感研究是一个很窄的研究领域,还存在其它的一些不足。如,对森林病虫害引起的林冠动态的遥感监测,就面临着以下挑战:1)由于病虫害爆发的机制决定了最有效的遥感监测时间很短,而在此期间还可能缺少无云的遥感影像。2)过去的地面光谱观测多在叶片层次上进行,因此,这些观测可能还不能完全满足对冠层层次的遥感监测的需要。3)病虫害导致的失叶或

图2 Herwitz 等(2000b)研究林冠动态的技术路线
Fig.2 Steps to study canopy dynamics (Herwitz et al., 2000b)

树木死亡的准确的地面野外观测本身就存在难度,更何况在太空层次的卫星遥感监测了。4)有许多限制因子影响着病虫害的发生,这样,对这些限制因子的认识也制约着对病虫害引起的林冠动态的遥感监测精度。

虽然航空遥感的空间分辨率高、时效性好,在林冠动态监测研究中具有重要地位,特别是数字多光谱数据的应用前途广阔。但是,由于在空域管理制度方面的限制等,航空遥感不可能作为我国林冠动态变化(如由森林病虫害引起的林冠变化)监测的常规手段,只能在重大灾情发生时,作为卫星遥感的一种补充。另外,由于航空遥感所需经费较多,因此研究经费的限制也将制约其在林冠动态研究中的应用,特别是在我国。

林冠动态的遥感监测研究对研究者的较高需求也限制了该研究领域的发展。因为这需要多专业学科的交叉与融合,涉及林学、植物学、森林保护学、生态学、自然地理学、遥感、地理信息系统等学科的知识与经验。

5 展 望

遥感在森林制图、森林资源详查与监测、林火及森林病虫害检测与监测等方面的地位和作用已被广泛认识,并且遥感在林冠动态研究中的应用也越来越广。

过去的卫星遥感数据的空间分辨率不高, TM 为 30 m, MSS 为 80 m, SPOT 卫星数据的分辨率为 10 m 和 20 m, 因此还不能利用这些数据来研究林冠的细微动态。随着空间分辨率更高的卫星如 SPOT5, IKONOS, QuickBird 等的相继升空, 米级、分米级分辨率的卫星数据将在林冠动态研究中发挥更积极的作用。特别是 QuickBird 卫星数据, 其空间分辨率和时间分辨率都很高, 星下点分辨率为 0.61 m (全波段) 和 2.44 m (多光谱), 重访周期为 1~6 d。因此, 在小尺度林冠动态的遥感监测研究领域具有广阔发展前景。但这些卫星数据的昂贵价格将限制其在较大尺度林冠动态研究中的应用。

航空遥感将继续在林冠动态研究中占据主要地位, 特别是多时相、高分辨率多光谱数字航空影像在林冠动态研究中具有重要地位。正射影像技术也将在林冠动态研究中发挥更大作用。由于雷达遥感具有全天候和夜间探测能力, 因此, 其在林冠动态研究中的应用前途广阔。

在研究方法上, GIS 技术及各种数学方法的地

位和作用已越来越突出 (Ardo *et al.*, 1997)。Stone 等 (2000) 就利用 GIS 整合不同空间分辨率航空遥感数据、机载高光谱数据、地形和环境数据等, 结合地面观测来监测澳洲的桉树林的林冠变化及其森林健康。

随着遥感在林冠动态检测、监测等方面研究的理论、技术方法的成熟与逐步推广, 未来的工作将更侧重于林冠动态的机理研究。

参 考 文 献

- Aldrich, R. C., R. C. Heller & W. F. Bailey. 1958. Observation limits for aerial sketch-mapping southern pine beetle damage in the southern Appalachians. *Journal of Forestry*, **56**: 200 ~ 202.
- Ardo, J., P. Pilesjo & A. Skidmore. 1997. Neural networks, multitemporal Landsat Thematic Mapper data and topographic data to classify forest damages in the Czech Republic. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **23**: 217 ~ 229.
- Blackburn, G. A. & E. J. Milton. 1997. An ecological survey of deciduous woodlands using airborne remote sensing and geographical information systems (GIS). *International Journal of Remote Sensing*, **18**: 1919 ~ 1935.
- Brockhaus, J. A., S. Khorram, R. I. Bruck, M. V. Campbell & C. Stallings. 1992. A comparison of Landsat TM and SPOT HRV data for use in the development of forest defoliation models. *International Journal of Remote Sensing*, **13**: 3235 ~ 3240.
- Cameron, A. D., D. R. Miller, F. Ramsay, I. Nikolaou & G. C. Clarke. 2000. Temporal measurement of the loss of native pinewood in Scotland through the analysis of orthorectified aerial photographs. *Journal of Environmental Management*, **58**: 33 ~ 43.
- Clay, G. R. & S. E. Marsh. 1997. Spectral analysis for articulating scenic color changes in a forested environment. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **63**: 1353 ~ 1362.
- Clay, G. R. & S. E. Marsh. 2001. Monitoring forest transitions using scanned ground photographs as a primary data source. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **67**: 319 ~ 330.
- Collins, J. B. & C. E. Woodcock. 1996. An assessment of several linear change detection techniques for mapping forest mortality using multitemporal Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, **56**: 65 ~ 77.
- Coppin, P. R. & M. E. Bauer. 1994. Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **32**: 918 ~ 927.
- Ekstrand, S. P. 1990. Detection of moderate damage on Norway spruce using Landsat TM and digital stand data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **28**: 685 ~ 691.
- Everitt, J. H., D. E. Escobar, D. N. Appel, W. G. Riggs & M. R. Davis. 1999. Using airborne digital imagery for detecting oak wilt disease. *Plant Disease*, **83**: 502 ~ 505.
- Fletcher, R. S., M. Skaria, D. E. Escobar & J. H. Everitt. 2001. Field spectra and airborne digital imagery for detecting *Phytophthora* footrot infections in citrus trees. *Hortscience*, **36**: 94 ~ 97.
- Franklin, S. E. & A. G. Raske. 1994. Satellite remote sensing of spruce budworm forest defoliation in western Newfoundland. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **20**: 30 ~ 48.
- Gougeon, F. A. 1995. A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution

- aerial images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **21**: 274 ~ 284.
- Guo, Z. H. (郭志华), S. L. Peng (彭少麟), B. S. Wang (王伯荪) & Z. Zhang (张征). 1999. Estimation of radiation absorbed by Guangdong vegetation using GIS and RS. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **19**: 441 ~ 447. (in Chinese with English abstract)
- Guo, Z. H. (郭志华), S. L. Peng (彭少麟) & B. S. Wang (王伯荪). 2001a. Multitemporal NOAA-AVHRR *NDVI* and GIS based methods for the estimation of solar energy use efficiency in Guangdong. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), **43**: 857 ~ 862. (in Chinese with English abstract)
- Guo, Z. H. (郭志华), S. L. Peng (彭少麟) & B. S. Wang (王伯荪). 2001b. Use GIS and RS to estimate terrestrial net primary production for Guangdong, China from AVHRR *NDVI* and ground meteorological data. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **21**: 1444 ~ 1449. (in Chinese with English abstract)
- Haara, A. & S. Nevalainen. 2002. Detection of dead or defoliated spruces using digital aerial data. *Forest Ecology and Management*, **160**: 97 ~ 107.
- Herwitz, S. R., B. Sandler & R. E. Slye. 2000a. Twenty-one years of crown area change in the Jasper Ridge Biological Preserve based on georeferenced multitemporal aerial photographs. *International Journal of Remote Sensing*, **21**: 45 ~ 60.
- Herwitz, S. R., R. E. Slye & S. M. Turton. 1998. Co-registered aerial stereopairs from low-flying aircraft for the analysis of long-term tropical rainforest canopy dynamics. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **64**: 397 ~ 405.
- Herwitz, S. R., S. M. Turton & R. E. Slye. 2000b. Long-term survivorship and crown area dynamics of tropical rain forest canopy trees. *Ecology*, **81**: 585 ~ 597.
- Howard, J. A. 1991. Remote sensing of forest resources. London: Chapman and Hall. 420.
- Hubbel, S. P. & R. B. Foster. 1986. Canopy gaps and the dynamics of a neotropical forest. In: Crawly M. J. ed. *Plant ecology*. Oxford: Blackwell Scientific. 77 ~ 96.
- Hubbell, S. P., R. B. Foster, S. T. O'Brian, K. E. Harms, R. Condit, B. Webbsler, S. J. Wright & S. Loo de Lao. 1999. Light gap disturbances, recruitment limitation, and tree diversity in a neotropical forest. *Science*, **283**: 554 ~ 557.
- Leckie, D. G. & D. P. Ostaff. 1988. Classification of airborne multispectral scanner data for mapping current defoliation caused by the spruce budworm. *Forest Science*, **34**: 259 ~ 279.
- Mukai, Y. & I. Hasegawa. 2000. Extraction of damaged area of windfall trees by typhoon using Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, **21**: 647 ~ 654.
- Nelson, R. F. 1983. Detecting forest canopy change due to insect activity using Landsat MSS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **49**: 1303 ~ 1314.
- Nakashizuka, T. 1987. Regeneration dynamics of beech forests in Japan. *Vegetatio*, **69**: 169 ~ 175.
- Nakashizuka, T., T. Katsuku & H. Tanaka. 1995. Forest canopy structure analyzed by using aerial photographs. *Ecological Research*, **10**: 13 ~ 18.
- Peng, S. L. (彭少麟), Z. H. Guo (郭志华) & B. S. Wang (王伯荪). 1999. Applications of RS and GIS on terrestrial vegetation ecology. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **18**: 52 ~ 64. (in Chinese with English abstract)
- Peng, S. L. (彭少麟), Z. H. Guo (郭志华) & B. S. Wang (王伯荪). 2000. Use of GIS and RS to estimate the light utilization efficiency of the vegetation in Guangdong, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **20**: 903 ~ 909. (in Chinese with English abstract)
- Pickett, S. T. A. & P. S. White. 1985. *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. New York: Academic Press.
- Radeloff, V. C., D. J. Mladenoff & M. S. Boyce. 1999. Detecting jack pine budworm defoliation using spectral mixture analysis: separating effects from determinants. *Remote Sensing of Environment*, **69**: 156 ~ 169.
- Radeloff, V. C., M. S. Boyce & D. J. Mladenoff. 2000. Effects of interacting disturbances on landscape patterns: budworm defoliation and salvage logging. *Ecological Applications*, **10**: 233 ~ 247.
- Robed, P. S. & A. M. Lopez. 1995. Monitoring burnt areas by principal components analysis of multi-temporal TM data. *International Journal of Remote Sensing*, **16**: 1577 ~ 1587.
- Royle, D. D. & R. H. Lathrop. 1997. Monitoring hemlock forest health in New Jersey using Landsat TM data and change detection techniques. *Forest Science*, **43**: 327 ~ 335.
- Schnitzer, S. N. & W. P. Carson. 2001. Treefall gaps and the maintenance of species diversity in a tropical forest. *Ecology*, **82**: 913 ~ 919.
- Spanner, M. A., L. L. Pierce, D. L. Peterson & S. W. Running. 1990. Remote sensing of temperate coniferous forest leaf area index: the influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, **11**: 95 ~ 111.
- Stone, C., N. Coops & D. Culvenor. 2000. Conceptual development of a eucalypt canopy condition index using high resolution spatial and spectral remote sensing imagery. *Journal of Sustainable Forestry*, **11**(4): 23 ~ 45.
- Tanaka, H. & T. Nakashizuka. 1997. Fifteen years of canopy dynamics analyzed by aerial photographs in a temperate deciduous forest, Japan. *Ecology*, **58**: 835 ~ 841.
- White, P. S. 1979. Pattern, process, and natural disturbance in vegetation. *Botanical Review*, **45**: 229 ~ 299.
- Williams, D. L., R. E. Nelson & C. L. Dottavio. 1985. A georeferenced Landsat digital database for forest insect-damage assessment. *International Journal of Remote Sensing*, **6**: 643 ~ 656.
- Zang, R. G. (臧润国), J. Y. Liu (刘静艳) & D. F. Dong (董大方). 1999. Gap dynamics and forest biodiversity. Beijing: China Forestry Publishing House. (in Chinese with English abstract)