

用 MODIS 遥感数据监测东亚飞蝗灾害 ——以河北省南大港为例

季荣¹, 张霞², 谢宝瑜¹, 李哲¹, 刘团结², 刘闯³, 李典谟^{1*}

(1. 中国科学院动物研究所, 农业害虫鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100080; 2. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 东亚飞蝗自 20 世纪 80 年代以来在我国再度猖獗危害。本文选择国家一类蝗区河北省南大港农场水库为实验区, 以 2002 年东亚飞蝗(夏蝗)大发生为背景, 测定了不同受害程度芦苇的光谱曲线, 并用 MODIS 遥感数据分析蝗灾危害范围和程度。结果表明, 健康芦苇(未受害)呈现出典型植被光谱的“峰和谷”特征; 而受害芦苇, 其红光区处反射率增加, 且受害程度越重, 增加愈显著, 近红外区的反射率则显著降低, 且受害程度越重, 反射率愈低。比较多时相归一化植被指数(NDVI)受灾前后的变化, NDVI 值增加表明未受蝗虫危害, 而其下降则表明是受灾区域, 结合地面数据, 找出了不同危害程度的 NDVI 临界值; 其次根据像元累计法, 确定了不同受灾程度的面积。结果显示, NDVI 小于 0.2156 和 0.2389 分别为严重受灾区和中等受灾区, 其发生面积依次为 168.74 hm² 和 337.48 hm², 判对率分别为 72.97% 和 68.35%。MODIS 遥感监测蝗灾发生面积(中等受灾及严重受灾)占实际发生面积的 82.76%。研究结果为实时、快速、大面积监测蝗虫种群动态奠定了基础, 并为合理、经济地防治蝗灾提供了科学依据。

关键词: 东亚飞蝗; 蝗灾; 遥感监测; 光谱数据; MODIS 遥感数据; 归一化植被指数; 地面实查

中图分类号: Q968 **文献标识码:** A **文章编号:** 0454-6296(2003)06-0713-07

Use of MODIS data to detect the Oriental migratory locust plague: A case study in Nandagang, Hebei Province

Ji Rong¹, ZHANG Xia², XIE Bao-Yu¹, LI Zhe¹, LIU Tuan-Jie², LIU Chuang³, LI Dian-Mo^{1*} (1. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Outbreaks of the Oriental migratory locust, *Locusta migratoria manilensis* (Meyen) have once again become a serious problem in the last two decades of the 20th century in China. One of the coastal breeding areas of the locust, Nandagang reservoir of Hebei Province was chosen as study area in this paper. Against the background of the locust outbreak (summer locust) of this area in 2002, spectral reflectance curves of reeds for different damaged degrees (heavy, moderate or no damage) were measured and determined. The results showed that healthy reeds manifested the “peak-and-valley” configuration as that of other healthy green vegetation. But for damaged reeds the red reflectance increased, and the heavier the damage, the higher the red reflectance values, whereas the reflectance in the near infrared bands decreased dramatically with the damage escalating. Additionally, the locust-damaged areas and degrees were determined using MODIS data. Comparisons of NDVI changes between pre- and post-damage showed that the increase for the same site in NDVI relative to the pre-damage situation corresponded to the undamaged areas whereas the decrease in NDVI corresponded to the damaged areas. Coupled with the ground truth data, critical values of NDVI for heavy and moderate damage were determined as 0.2156 and 0.2389 respectively. Namely, areas with NDVI less than 0.2156 were identified as

基金项目: 科技部 973 重大基础研究项目 (G2000016210); 国家自然科学基金项目 (30270858, 30170596); 中国科学院知识创新项目 (KSCX2-SW-103, KSCX2-1-02); 中国科学院创新工程领域前沿资助项目 (KSCX3-10Z-04)

作者简介: 季荣, 女, 1970 年 6 月生, 江苏人, 博士生, 讲师, 研究方向害虫种群生态学及其遥感监测, E-mail: jirong@panda.ioz.ac.cn

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: lidm@panda.ioz.ac.cn

收稿日期 Received: 2003-04-24; 接受日期 Accepted: 2003-10-21

with heavy damage; while areas with NDVI less than 0.2389 as with moderate damage. By calculating the numbers of pixels, areas discriminated from MODIS images as with heavy and moderate damage were 168.74 hm² and 337.48 hm² respectively, with 72.97% and 68.35% accuracy respectively evaluated by the ground truth data. The total damaged areas identified from MODIS data amounted to 82.67% of actual occurrence areas. These findings contributed to the scientific foundation for quickly monitoring the dynamics of locust populations in real time and at large scale and efficiently controlling locust plague.

Key words: *Locusta migratoria manilensis*; locust plague; remote sensing monitoring; spectral data; MODIS data; NDVI; ground truth

蝗虫是可给农作物和草场造成严重危害的昆虫,蝗灾也是一种世界性的灾害,全世界除南极外,各大洲均有蝗灾发生(朱恩林,1999)。近年来,由于全球性气候变化、水热季节性分配失调引起旱、涝灾害的频繁发生及人类对自然资源过度开发利用而导致生态条件与环境的日益恶化,都无疑加重了蝗灾的发生频率和危害程度(陈永林,2000a,2000b)。据统计,我国2001年东亚飞蝗发生面积约115万公顷,而草原各种蝗虫发生面积更高达1500万公顷,给农牧业造成了巨大损失(黄辉和朱恩林,2001)。蝗灾再次频繁发生充分暴露出我国目前蝗虫监测和预报体系存在的不足。利用遥感技术及时、准确地预报灾情,选择灭蝗的最佳时机等研究成为当前我国蝗灾监测、预测和防治的当务之急。

将遥感技术用于农作物重大病虫害的监测与预测是我国实施精准农业的重要组成部分。遥感技术用于农业病虫害综合治理,最终期望达到两个目的:第一,早期预报,即通过遥感图像提取生境中与病虫害暴发有关的主要环境要素及其变化,来推断病虫害最有可能发生的区域;第二,灾情监测和评估,即当病虫害已经在局部区域造成危害时,从遥感图像上提取受害植被相关信息,快速、准确地判断出灾情发生状况(分布、面积和程度),及时采取针对性的点、片防治措施,这样既可阻止病虫害进一步蔓延又可减少环境污染(以往是地毯式化学防治)。

蝗虫个体较小,不能从卫星遥感和常规遥感图像上直接识别,但蝗虫的发育、生长和繁殖都与其生境有密切的关系。发达国家自20世纪70年代开始利用卫星遥感图像监测蝗虫生境,到目前已达到借助3S技术平台大尺度综合评价蝗虫生境中生物因子(植被)和非生物因子(海拔、温度、降雨和土壤等),预测蝗灾最有可能暴发的区域及监测蝗灾发生频率较高的区域(Hielkema,1977,1980;

McCulloch and hunter, 1983; Tucker *et al.*, 1985; Hielkema *et al.*, 1986; Bryceson, 1989; Nailand, 1993; Schell and Lockwood, 1995; Latchinsky, 2002)。国内将遥感技术用于蝗虫灾害方面的研究较少且起步晚,已报道的实例包括利用3S技术判断出环青海湖地区草地蝗虫多发地的生境类型(蒋建军等,2002)和初步建立草地蝗虫遥感监测及预测系统(倪绍祥,2002)。

本文选择国家一类蝗区(即常年重点防治地区)河北省南大港国营农场水库为研究区,把受害植被光谱信息的提取作为切入点,通过分析比较受灾前后多时相MODIS-NDVI的变化,旨在:1)找出研究区域2002年夏蝗虫源基地(即2001年秋蝗产卵地);2)确定研究区域2002年夏蝗的危害面积和危害程度;3)以地面调查为依据,对MODIS遥感数据的分析结果作出评价,以进一步说明MODIS遥感数据用于监测蝗灾的可行性。

1 材料与方法

1.1 实验区描述

南大港水库(N38°28.04'~N38°33.54',E117°25.74'~E117°32.78')位于河北省黄骅市南大港国营农场境内,东临渤海,属于泻洪入海口区域,面积约4700 hm²(图1左)。近10年来,由于天旱降雨量少、地下水利用过度、人工蓄水不足等原因,库区内除低洼地和防火沟里有季节性的积水外,常年无水。植被以芦苇为主,伴有盐地碱蓬 *Suaeda salsa* (L.) Pall, 碱蓬 *S. glauca* (Bunge) Bunge, 狗尾草 *Setaria viridis* (L.) Beauv., 苔草 *Carex* sp., 稗草 *Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv., 荻 *Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Benth. 等植物。

南大港国营农场是典型的沿海蝗区,也是历史上有名的老蝗区及东亚飞蝗的主要发生基地之一(马世骏,1965)。自1991~2002年期间,有6年飞

蝗大发生, 其中 2002 年仅夏蝗发生面积就超过 20 000 hm^2 (占全农场总面积的 68%), 芦苇被 3~5 龄群居型的蝗蝻危害致只剩茎秆的面积就超过 1 300 hm^2 , 蝗蝻最高密度达 8 000 头/ m^2 (季荣等,

2002)。南大港农场已被列为国家一类蝗区, 即常年防治的重点地区 (朱恩林, 1999)。水库是南大港农场蝗虫严重发生区, 每年高密度的群居型蝗蝻和成虫都主要分布在库区内。

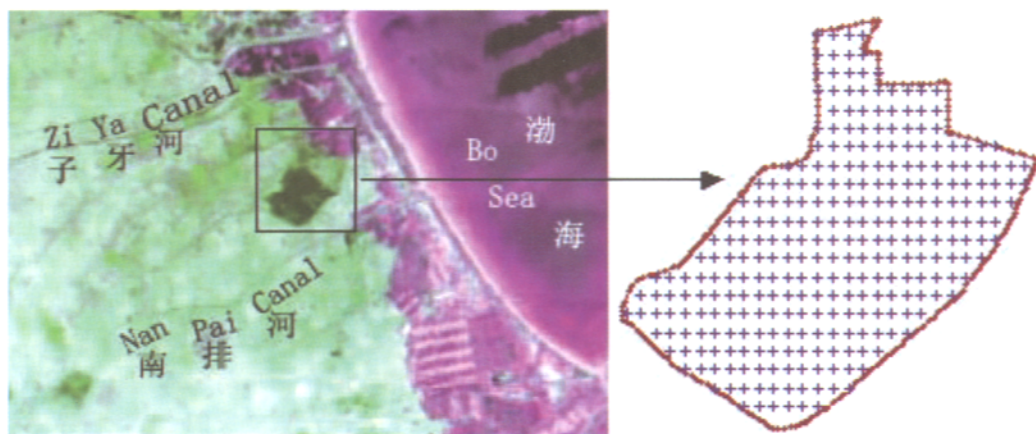


图 1 研究区范围示意图 (左) 及地面调查样点分布 (右)

Fig.1 The sketch map of study area (combination of MODIS 1, 2 bands) (left) and distribution of survey samples (right)

+ 示调查点 Showing sample sites.

1.2 数据采集与处理

1.2.1 地面调查: 首先在已有经纬度信息的研究区域轮廓图上采用等距栅格取样法 (栅格大小 450 m $\times$ 450 m), 共取 289 个样点, 实际调查时每点位置用 GPS 准确定位, 然后将 GPS 记录的定位信息用美国 GAMIN 公司提供的 PCX5 软件处理, 得到其空间布局图 (图 1 右)。从 5~10 月对样点跟踪调查, 详细记录蝗虫发育阶段及蝗虫危害的发生时间、数量、范围及危害程度等。另外, 6 月初于飞机防治蝗灾前, 把蝗虫危害的每个斑块用 GPS 标记。

在对蝗虫危害情况进行地面调查时, 以受害芦苇来确定受灾程度的指标: 芦苇只剩茎秆为严重受害; 芦苇上部 3 片叶被危害成细丝状, 下部叶片有零星缺刻为中等受害 (调查时, 芦苇平均 5~8 片叶); 未受蝗虫危害的为健康芦苇。

1.2.2 受害芦苇光谱数据的测定: 遥感技术对目标进行探测和识别, 是以各种物体对不同光谱波段电磁波辐射的发射和反射差异作为理论基础的。在可见光与近红外光区之间, 遥感器接收到的主要是地物对太阳辐射的反射效应。植被既是图像上的重要元素又是蝗虫危害的主要对象, 其反射效应受到植物相应的物理和生理机制控制, 即植物的种类、生长发育阶段、健康状况, 以及叶的构造、叶面粗

糙程度、叶绿体含量、细胞含水量和光合作用的强弱等, 都影响植物的光谱效应。因此, 受害植被光谱曲线的测定是遥感监测蝗灾的第一步。

2002 年夏蝗危害盛期, 选择一晴朗无云天气, 在实验区获取健康芦苇和受不同程度蝗灾危害芦苇的光谱曲线。所用仪器为野外便携式 SE590 光谱仪, 具有 252 个光谱通道, 光谱测量范围为 400 nm~1 100 nm, 光谱分辨率为 3 nm。

1.2.3 多时相遥感数据选择: 时相选择是整个遥感监测的关键, 只有选择正确时期的遥感图像, 才能达到监测的目的。本文选择三个时期的无云图像, 主要是根据研究区域内 2002 年蝗灾发展进程而定。根据地面调查, 2002 年 5 月 22 日, 研究区域内蝗蝻正处于活动范围及食量都很小的 1~2 龄, 且以稗草、荻等禾本科杂草为食物, 因此这一时期的芦苇基本上是未受虫害影响的健康生长。5 月底, 进入 3 龄盛期和 4 龄初期的蝗蝻已经对芦苇造成危害, 且食量显著增加, 啃食完孵化地块 (2001 年秋蝗产卵地) 的芦苇后, 继续向外扩散危害 (但还未对扩散区造成严重危害)。因而, 5 月 31 日芦苇严重受害区域即可作为 2002 年蝗灾孳生地 (虫源基地)。而至 6 月 7 日前后, 地面大量处于 4 龄末期和 5 龄盛期的高密度群居型蝗蝻已在水库内造成严重危害, 大面积芦苇被吃成光秆; 另外, 研究

区域 6 月 8 日开始用飞机防治蝗虫, 故选 6 月 7 日作为蝗虫危害面积最大和程度最重的时间。

1.2.4 遥感数据预处理: 所有图像均采用遥感图像分析软件 ENVI[®] 3.5 处理。预处理主要是精确的几何纠正, 这是不同时相图像之间对比的基础。方法是利用 MODIS HDF 文件中同时以波段形式提供的详细经纬度信息, 采用我国中小比例尺地图中常用 Albers 等积圆锥投影, 将 MODIS 的经纬度信息数据投影在这个坐标系下, 即首先建立待校准图像空间与 Albers 投影的标准空间之间的对应关系; 然后利用这种对应关系把所有像素变换到校准的标准空间中, 再采用双线性插值采样法, 最终得到几何纠正后的图像。定位误差控制在 1 个像素以内, 以后的分析均在经几何精纠正后的带有经纬度信息的图像上进行。

1.3 确定蝗灾分布范围和危害程度

1.3.1 植被指数的选择: 植被指数 (不同光谱波段间的组合方式) 可反映出绿色植物光谱特征的差异及其变化。目前已有 40 余种植被指数, 如归一化植被指数 (NDVI)、比值植被指数 (RVI)、垂直植被指数 (PVI)、绿色植被指数 (GVI)、差值植被指数 (DVI)、增强植被指数 (EVI) 等 (田庆久和闵祥军, 1998)。因研究区域、植被种类及其长势不同, 所选用的植被指数应不同, 即每种植被指数在应用时都有它的适应性和局限性。例如, RVI 对高覆盖度的植被十分敏感, 与生物量的相关性很好, 但不能很好识别植被密度差异; PVI、GVI 两种植被指数均可减少土壤背景值对植物光谱的影响, 但却不能准确反映丘陵、山地的植被状况。NDVI 是植物生长状况及植被空间分布密度的最佳指示因子, 也是应用最广泛的一种植被指数, 其与植物分布密度呈线性关系, 当植被覆盖度小于 80% 时, NDVI 随植被生物量呈线性增加, 而当植被覆盖度大于 80% 时, NDVI 对植被检测的灵敏度下降。根据南大港水库内植被覆盖度平均小于 70% 的特点, 本文选择了归一化植被指数 (NDVI)。

1.3.2 制图方法: 采用 $NDVI = (X_{NIR} - X_{RED}) / (X_{NIR} + X_{RED})$, X_{RED} 、 X_{NIR} 分别是 MODIS 第 1、2 波段。得到三个不同时期的 NDVI 图后, 参考直方图间隙对 NDVI 值进行密度分割, 并把数值相近的像素归为一类, 这样既能将不同类型的地物区别开来, 又可依据不同时期 NDVI 值的差异, 判断植被长势。为了便于图像之间的比较, 2002 年 5 月 31

日和 6 月 7 日的 NDVI 图像, 均采用 2002 年 5 月 22 日的密度分割区间制图。

1.3.3 确定受灾面积和程度: 把 5 月 22 日的 NDVI 图作为研究区域植被的健康底图, 分别将 5 月 31 日和 6 月 7 日的 NDVI 图与之比较。NDVI 增加说明植被未受蝗虫危害; 而芦苇受害必反映在 NDVI 值的下降, 下降幅度与受害程度有关, 下降范围和分布则反映了地面植被受害的范围和分布。换言之, 5 月 31 日 NDVI 下降的区域则可判断为 2002 年卵孵化地 (虫源基地); 而 6 月 7 日 NDVI 下降的区域则可作为 2002 年研究区域内夏蝗危害范围。统计 5 月 31 日和 6 月 7 日 NDVI 下降区域内的像元数即可分别估算出虫源基地及夏蝗危害面积, 并依据地面详查数据, 结合当地植保部门提供的灾情资料, 确定中等受灾与严重受灾的 NDVI 临界值。

1.4 对遥感监测结果的评价

依据地面调查数据, 对 MODIS 遥感数据分析结果的准确程度做出评价。把遥感图像上判断为中等受灾及严重受灾的区域分别与地面实查数据比较, 为了便于对比分析, 把地面调查的中等受灾及严重受灾面积分别换算成遥感图像上的计数单位像元数 (本文所用分辨率 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$)。

2 结果与分析

2.1 不同受害程度芦苇光谱曲线比较

图 2 是健康芦苇与受不同程度蝗灾危害芦苇的光谱曲线。从图 2 可看出, 严重受害、中等受害及健康芦苇 (未受害) 的光谱曲线存在明显差异。健康芦苇的光谱曲线, 呈现出典型植被光谱的“峰和谷”特征: 叶绿素的强烈吸收在可见光部分形成两个低谷 (约在 480 nm 和 670 nm 的蓝、红光处, 分别称为蓝谷和红谷) 和一个绿峰 (560 nm 左右); 再者, 由于叶片内部组织结构 (细胞结构) 多次散射, 又在近红外区形成一个高反射率平台。而当芦苇遭受蝗虫危害后, 其光谱曲线与健康芦苇的相比, 红光区红谷现象减弱, 即反射率增加 (叶绿素受到破坏所致), 且受害程度越重, 增加愈显著; 近红外区的反射率则显著降低, 且受害程度越重, 反射率愈低; 当芦苇遭受严重危害 (只剩下茎秆) 后, 其光谱曲线已呈现出背景——土壤的光谱特征。正是健康芦苇与受害芦苇在光谱特性上的不同, 特别是在红光区和近红外区的显著差异, 构成了利用遥感技术监测蝗灾的理论基础。

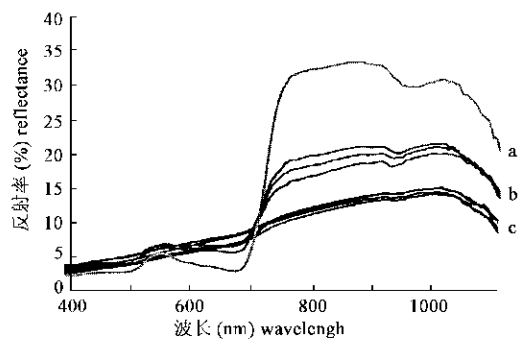


图2 健康芦苇与受蝗虫危害芦苇光谱曲线的比较

Fig.2 Comparison of spectral reflectance curves between healthy reeds and damaged reeds
a. 健康芦苇 Healthy reeds: 未受害 No damage;
b. 中等受害 Moderate damage: 上部3片叶成丝状 Three upper leaves having only veins;
c. 严重受害 Heavy damage: 只剩茎秆 Reeds having nothing but stalks.

2.2 受灾前后 NDVI 值比较及受灾面积和范围的确定

不同时期的 NDVI 图表明，受灾前后 NDVI 值明显不同，最大值呈上升趋势，而最小值则依次减小。5 月 22 日 NDVI 图显示，整个南大港水库芦苇的长势主要分为 4 个等级（分别以白、黄、绿、深绿表示，图 3A），NDVI 值介于 -0.1228 ~ -0.4242 之间；而 5 月 31 日和 6 月 7 日的 NDVI 最小值由于蝗虫危害分别下降到 -0.3455 和 -0.3461，未受蝗虫危害的健康芦苇则随着生长 NDVI 最大值分别增加到 0.4842 和 0.5350。

5 月 31 日专题图中 NDVI 下降的区域（与 5 月 22 日比较），以“+”表示在图 3B，从理论角度分析，即可作为 2002 年蝗灾孳生地（虫源基地）。然而，参照地面实际调查情况，“+”所示区域并非 2002 年蝗灾孳生地。因此，由于受限于 MODIS 250 m 的最大空间分辨率以及成虫具集中产卵等习性，若仅以植被指数 NDVI 值的下降来监测和判断蝗虫孳生地，可能会影响结果的准确性。

6 月 7 日前后，地面大量处于 4 龄末期和 5 龄盛期的高密度群居型蝗蚰和少量的成虫已在水库内造成严重危害。由于 4~5 龄蝗蚰具有聚集危害且蚕食芦苇直至光杆后才迁移等习性，故从同日的 MODIS-NDVI 图，可清晰地辨别出 NDVI 下降的区域（图 3C 以蓝色、红色表示）；并结合地面数据，确定 NDVI 下降至或小于 0.2389 为中等受灾区，NDVI 下降至或小于 0.2156 为严重受灾区，分别以蓝色和红色表示在 6 月 7 日的专题图上（图 3C）。根据像元数累计法，估算中等受灾和严重受灾的面积分别为 337.48 hm² 和 168.74 hm²。

2.3 对遥感数据分析结果的评价

地面调查的受灾面积经换算后为 116 个像元，其中 79 个为中等受灾，37 个为严重受灾。MODIS 遥感数据判断的结果为 54 个中等受灾，27 个严重受灾，判对率分别为 68.35% 和 72.97%（表 1）。综合考虑 MODIS 数据判断为中等受灾与严重受灾的像元总数，准确率为 82.76%（96/116）。表 1 结果表明，MODIS 数据对严重受灾区域较为敏感；然

图3 2002 年南大港水库不同时期 MODIS-NDVI 图及蝗虫危害分布图

Fig.3 Multi-temporal MODIS-NDVI thematic maps and the distribution of locust-damage areas in Nandagang reservoir, 2002

而，一些严重受灾区域仍被误判成未受灾区域 (21.62%)，分析其原因可能是覆盖有稀疏植被的未受灾区域的地物光谱曲线与芦苇遭受严重危害后

的光谱曲线极为相似所致，因为都呈现出背景——土壤的光谱特征。

表 1 MODIS 遥感数据监测结果与地面实查数据比较
Table 1 Comparison of results from MODIS data and ground surveys

MODIS 分析结果 Results from MODIS data	地面调查受灾像元数 (个) Numbers of damaged pixels from ground surveys		
	中等受灾 Moderate damage	严重受灾 Heavy damage	像元总数 Total number
中等受灾 Moderate damage	54 (68.35)	2 (5.41)	56
严重受灾 Heavy damage	13 (16.46)	27 (72.97)	40
未受灾 No damage	12 (15.19)	8 (21.62)	20
像元总数 Total number	79	37	116

注 Notes: 括号内数值为 MODIS 分析的受灾像元数与地面实际调查受灾像元数之比 Numerals in parentheses are ratios (%) of damaged pixels from MODIS data to those from ground surveys.

3 讨论

本文研究结果证实了利用当前世界新一代“图谱合一”的光学遥感仪器 MODIS 遥感数据，与地面调查结合建立判读特征，可较准确地反映出蝗灾危害范围和程度，并在监测速度、监测范围及成本上都优越于过去传统的调查方法。从而为大尺度、实时监测蝗灾发生动态提供了广阔的应用前景。

利用遥感技术预测和监测东亚飞蝗蝗灾，不同于国外在此方面研究较多的沙漠蝗。对后者而言，环境中植被的有或无决定着其存在的可能性；而对主要栖息于沿海、滨湖和河泛等区域的东亚飞蝗来说，则是植被覆盖度的大小起着决定性作用。而这无疑增加了凭借遥感技术预测和监测东亚飞蝗蝗灾的难度，即通过遥感图像不仅要识别出植被的有无，而且要判断出植被密度及其随蝗虫危害而发生的变化。

其次，利用遥感图像进行蝗虫危害调查时，遥感图上芦苇植被指数的差异和改变是自然地理环境，即下垫面的组成、分布及各种灾害影响的综合反映，而且受大气空间-时相变化的影响。所以，本研究为了将地物差异、其它灾害对芦苇造成的影响与蝗虫对其危害的影响之间区别开来，取研究区 5 月 22 日的 NDVI 图像作为背景资料，此时地面芦苇覆盖度较低，易确定河道、裸露地、死芦苇地，它们在 5 月 31 日和 6 月 7 日的 NDVI 的图上也表现为低值，因此，把这部分排除；其次，研究区一直受东亚飞蝗危害（包括 2002 年），亦排除了其它病虫害对 NDVI 值的干扰。尽管如此，5 月 31 日的 NDVI 专题图仍然出现了不明原因所致的植被指数

值下降。因此，作者认为在监测农业病虫害遥感技术应用的初期阶段，详细的地面调查数据必不可少，其重要性甚至超过遥感植被指数本身，因为脱离地面调查仅仅依靠后者，很容易对地面实际情况产生误判，从而失去遥感监测病虫害的意义和价值。

再者，研究结果表明，MODIS-NDVI 能更好地反映出严重受灾的区域，判对率为 72.97%。但是，无论是中等受灾还是严重危害区，若面积小于 250 m×250 m (MODIS 的最高空间分辨率)，仍然不能有效地监测出，从而影响了对危害程度及面积准确程度的判断。

最后，由于受 MODIS 空间分辨率的限制，作者认为若单独利用其来监测蝗虫孳生地（即前一年秋蝗集中产卵或越冬卵集中孵化的区域），可能并不是一种有效的手段。因此，建议同时使用不同传感器和不同时相的遥感数据，即多源信息的融合，可更好地发挥不同遥感源的优势互补，有利于综合、准确地分析蝗灾危害情况。如 MODIS 具高时间分辨率（2 次/天），TM 数据则不具备这个特点（重访周期 16 天），但其空间分辨率高（30 m，15 m），两者融合即可提高图像的空间和时间分辨率，又保持了丰富的光谱信息。

参 考 文 献 (References)

Bryceson K P, 1989. The use of Landsat MSS data to determine the distribution of locust eggbeds in the Riverina region of New South Wales, Australia. *Int. J. Remote Sensing*, 10 (11): 1 749–1 762.
Chen Y L, 2000a. Characteristics, causes of formation and ecological management of locust plagues. *Bulletin of Biology*, 35 (7): 1–5. [陈永林, 2000a. 蝗虫灾害的特点、成因和生态学治理. 生物学通报, 35 (7): 1–5]

- Chen Y L, 2000b. Main achievements of study on migratory locusts and its management in China. *Entomological Knowledge*, 37 (1): 50–59. [陈永林, 2000b. 中国的飞蝗研究及其治理的主要成就. 昆虫知识, 37 (1): 50–59]
- Hielkema J U, 1977. Application of Landsat Data in Desert Locust Survey and Control. AGP/LCC/77/11 [R]. FAO, Rome, Italy.
- Hielkema J U, Roffey J, Tucker C J, 1986. Assessment of ecological conditions associated with the 1980/81 desert locust plague upsurge in West Africa using environmental satellite data. *Int. J. Remote Sensing*, (11): 1 609–1 622.
- Hielkema J U, 1980. Remote Sensing Techniques and Methodologies for Monitoring Ecological Conditions for Desert Locust Population Development. FAO/USAID Final Report. FAO, Rome, Italy.
- Huang H, Zhu E L, 2001. Occurrence and control of locusts and grasshoppers in China. *China Nature*, (5): 29–30. [黄辉, 朱恩林, 2001. 我国蝗虫发生防治动态. 大自然, (5): 29–30]
- Ji R, Xie B Y, Li Z, Li D M, Zhang X, Liu T J, Liu J D, Yang C Q, 2002. Reasons and characteristics of outbreak of the Oriental migratory locust *Locusta migratoria manilensis* plague in Nandagang, Hebei Province. *Entomological Knowledge*, 39 (6): 430–433. [季荣, 谢宝瑜, 李哲, 李典谟, 张霞, 刘团结, 刘金栋, 杨常青, 2002. 河北省南大港农场 2002 年夏蝗发生特点及原因浅析. 昆虫知识, 39 (6): 430–433]
- Jiang J J, Ni S X, Wei Y C, 2002. Knowledge based grasshoppers habit classification approach supported by GIS in Qinghai Lake region. *J. Remote Sensing*, 6 (5): 387–392. [蒋建军, 倪绍祥, 韦玉春, 2002. GIS 辅助下的环青海湖地区草地蝗虫生境分类研究. 遥感学报, 6 (5): 387–392]
- Latchininsky A V, 2002. Ecology of spatio-temporal grasshopper dynamics in Siberia via GIS and remote sensing. *Advances in Applied Acridology*. 2.
- Ma S J, 1965. Studies on Breeding Areas of the Oriental Migratory Locust in China. Beijing: Science Press. 150–184. [马世骏, 1965. 中国东亚飞蝗蝗区的研究. 北京: 科学出版社. 150–184]
- McCulloch L, Hunter D M, 1983. Identification and monitoring of Australian plague locust habitats from Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 13 (1): 95–102.
- Nailand P, 1993. The feasibility of using remote-sensing to predict and monitor irruptions of the brown locust, *Locustana pardalina* (Walker). *S. Afr. J. Sci.*, 89 (9): 425–426.
- Ni S X, 2002. Forecasting and Monitoring Grasshoppers in Qinghai Lake Region by Remote Sensing Techniques. Shanghai: Shanghai Science and Technique Press. 179–240. [倪绍祥, 2002. 环青海湖地区草地蝗虫遥感监测与预测. 上海: 上海科学技术出版社. 179–240]
- Schell S P, Lockwood J A, 1995. Spatial analysis optimizes grasshopper management. *GIS World*, 8 (11): 68–73.
- Tian Q J, Min X J, 1998. Advances in study on vegetation indices. *Advance in Earth Science*, 13 (4): 327–333. [田庆久, 闵祥军, 1998. 植被指数研究进展. 地球科学进展, 13 (4): 327–333]
- Tucker C J, Hielkema J U, Roffey J, 1985. The potential of satellite remote sensing of ecological conditions for survey and forecasting desert locust activity. *Int. J. Remote Sensing*, 6 (1): 127–138.
- Zhu E L, 1999. Occurrence and Management of the Oriental Migratory Locust in China. Beijing: China Agriculture Press. 3–38. [朱恩林, 1999. 中国东亚飞蝗发生与治理. 北京: 中国农业出版社. 3–38]