

灾害胁迫下建平县沙棘人工林的时空特性*

路常宽^{1,2**} 廖晓玉^{1,3} 王晓勤² 刘艳华³ 骆有庆^{1**}

(¹北京林业大学森林培育与保护教育部重点实验室 北京 100083)

(²河北科技师范学院 秦皇岛 066600)

(³燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004)

摘要 辽宁省建平县沙棘衰退主要是干旱胁迫和沙棘木蠹蛾蛀食危害复合作用的结果,本文中统称沙棘灾害。选择建平县东北部作为实验区,利用5期TM遥感图像研究沙棘林的光谱反射特征,并计算样地的归一化植被指数(NDVI),得到了沙棘植被多年变化特征。结果表明,NDVI增加表明沙棘林生长状况良好,而下降则表明在灾害胁迫下沙棘人工林出现衰退。结合地面数据,初步明确了沙棘灾害程度的NDVI临界值,以NDVI下降幅度至 ≤ 0.1 为轻度受灾区,NDVI下降幅度在 $0.1 < NDVI \leq 0.25$ 为中等受灾区,NDVI下降幅度 > 0.25 为严重受灾区。应用RS与GIS相结合方法,对研究区的遥感影像进行人机交互解译,得到5期土地利用类型分布以及面积统计,结果表明,1991~2004年间沙棘面积显著减少,主要向耕地、荒地与裸地转化。本研究结果为实时动态、大面积监测沙棘人工林灾害奠定了基础。图5表2参21

关键词 沙棘;沙棘木蠹蛾;灾害;遥感;时空特性

CLC S763.305 : S793.602

Temporal-spatial Characteristics of *Hippophae rhamnoides* Plantations Under Disaster Stresses In Jianping, Liaoning, China*

LU Changkuan^{1,2**}, LIAO Xiaoyu^{1,3}, WANG Xiaoqin², LIU Yanhua³ & LUO Youqing^{1**}

(¹Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

(²Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066600, Hebei, China)

(³College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract The degradation of seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides*) plantations in Jianping County, Liaoning is mainly caused by drought and seabuckthorn carpentermoth (*Holcocerus hippophaecolus*). Northwest Jianping was chosen as study area to approach the feasibility of dynamic monitoring of the damage extent and temporal-spatial characteristics of seabuckthorn disaster (called by this paper). According to TM images taken in 1991, 1993, 1997, 2001 and 2004, the spectral feature of *H. rhamnoides* was analyzed. The normalized difference vegetation index (NDVI) was computed in order to detect the dynamics of degradation of *H. rhamnoides*. Comparisons of multi-temporal NDVI changes show that the increase in NDVI indicated the undamaged areas, whereas the decrease in NDVI indicated the damaged areas. Coupled with the ground truth data, critical values of NDVI for different damaged degrees were determined, that is, $NDVI \leq 0.1$ indicates mild damage, $0.1 < NDVI \leq 0.25$ moderate damage, and decreased $NDVI > 0.25$ heavy damage. Combining RS with GIS, land use type distribution and area statistics were derived by interpreting the TM images on computer. It was shown that the cultivated areas of *H. rhamnoides* significantly decreased from 1991 to 2004, and they mainly became farmland, deserted land and bare land. These findings provide a scientific basis for preventing and combating seabuckthorn disaster. Fig 5, Tab 2, Ref 21

Keywords *Hippophae rhamnoides*; *Holcocerus hippophaecolus*; disaster; remote sensing; temporal-spatial characteristics

CLC S763.305 : S793.602

沙棘(*Hippophae rhamnoides*)作为水土保持和林业生态建设的主要先锋树种之一,在我国“三北”地区得到广泛栽培。目前,我国沙棘林面积已超过1 333 300 hm²,占世界沙棘人工林资源面积的90%以上^[1]。辽宁省建平县是我国沙棘栽培面积最大的县,从上个世纪70年代末开始在联合国“2772”工程援助下,大面积栽培沙棘。进入20世纪90年代后,沙棘进入旺盛生长期,而当地属于半干旱地区,年降水量仅为400 mm左右,无法满足沙棘旺盛生长期对水分的需求,从而出现干旱胁迫性衰退现象。90年代中期,沙棘木蠹蛾

(*Holcocerus hippophaecolus*)暴发成灾,钻蛀沙棘根干部^[2~4],单株最高虫口达百头以上,严重影响了沙棘水分疏导,有些林地甚至出现较大面积沙棘林枯死现象^[5],进一步导致沙棘衰退加速。这种由于干旱胁迫和沙棘木蠹蛾危害导致的沙棘衰退,在本研究中统称为沙棘灾害,目前已严重影响到沙棘林三大效益的发挥。

国内对沙棘木蠹蛾的研究始于上个世纪80年代,胡忠朗、方德齐等在陕西榆林地区酸刺(即沙棘)上发现酸刺木蠹蛾,称其为红木蠹蛾^[3];国内学者对沙棘木蠹蛾的生物学特性、性信息素结构和组分、幼虫空间分布特征以及模型预测受害程度等方面进行了研究^[2~9]。遥感技术已在森林病虫害监测中得到广泛应用^[10~20],但在大面积沙棘人工林灾害宏观监测方面还缺乏深入研究。沙棘人工林灾害总体表现为沙棘生长势较差,出现枯枝落叶、树叶褪色、有叶树冠缩小以及枯死等一系列症状,这些症状早期大范围的征兆通过传统的人工地面调查方式很难发现,而遥感技术,特别是不同波段

收稿日期: 2008-07-22 接受日期: 2008-10-24

*国家自然科学基金重点项目(No. 30730075)和北京林业大学森林培育与保护教育部重点实验室开放基金项目(No. B20060308) Supported by the Key Project of the National Natural Science Foundation of China (No. 30730075) and the Science Foundation of the Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University (No. B20060308)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: youqingluo@126.com; luchk888@163.com)

遥感影像,能提供大量的人眼无法早期识别的信息,从而可为监测沙棘灾害发生和发展趋势提供有益的途径。由于大面积沙棘人工林的历史比较短,区域范围的沙棘灾害动态演变还不清楚,因此,本研究运用多时相TM遥感影像对建平县沙棘灾害进行动态监测,为大面积监测沙棘人工林灾害奠定了理论和实践基础。

1 材料与方法

1.1 试验区描述

辽宁省建平县位于辽宁省西部,地处119°01'~120°02'E、40°17'~42°20'N之间,区内丘陵起伏,地形北高南低,属半干旱季风型大陆性气候,年平均气温5.5℃,年平均降水量487 mm。该区土壤主要为褐土,土壤侵蚀严重。由于地处科尔沁沙地南缘,该区干旱少雨,立地条件较差,生态环境较为脆弱。全县总面积48.6×10⁴ hm²,有林面积20.7×10⁴ hm²,森林覆被率为40%,主要树种有油松(*Pinus tabulaeformis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、杨树(*Populus* spp.)、山杏(*Prunus* spp.)等,其中沙棘林面积6.8×10⁴ hm²,占全国沙棘人工林总面积的12%。选择沙棘分布较典型的建平县东北部(即罗福沟乡、建平镇、杨树岭乡)作为试验区(图1)。

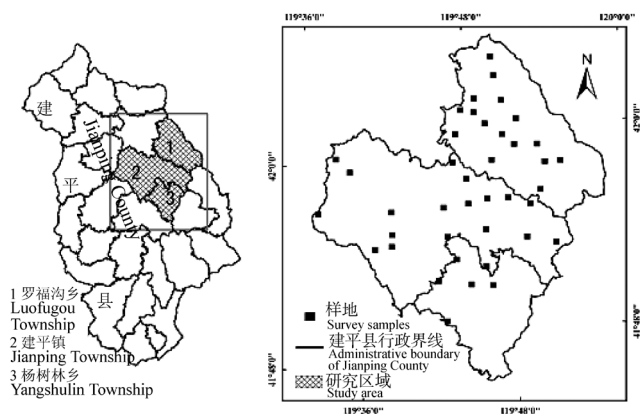


图1 研究区范围示意图(左)及地面调查样地分布(右)

Fig. 1 Map of study area (Left) and distribution of sampling sites (Right)

1.2 数据选择

采用美国陆地资源5号卫星(Landsat5)扫描成像的TM影像,像元分辨率为30 m,选用5期影像,时间分别为1991-09-07、1993-09-03、1997-08-29、2001-09-09和2004-07-31。从时间上看,除2004年外,其它4个时相的影像成像时间比较接近,从而能更好地克服季相引起的植被指数的误差。对所有TM数据采用传统的回归分析法进行大气散射校正,剔除由于云覆盖引起的伪变化信息,并进行几何精校正,采用Alberts等积圆锥投影,定位误差控制在一个像素以内。同时,将1:25 000林相图输入计算机,拼接转换得到像元为30 m×30 m的栅格数字林相图,以便于影像的准确匹配。根据多年观测,在建平县东北部选择样方为300 m×300 m分布均匀的40个沙棘样地,用于变化信息的提取分析(图1)。根据地面调查,沙棘木蠹蛾成虫始见于6月初,终见于9月初。幼虫数量在7月开始缓慢上升,8月以后数量急剧增加^[10],8月前后建平县降水较多,几乎占到全年降水量的80%,因此选择8、9月的沙

棘情况更能反映干旱胁迫和受沙棘木蠹蛾危害的复合灾害特征。

1.3 受害沙棘反射的遥感机理

沙棘木蠹蛾的危害和干旱胁迫影响了沙棘根系的发育,使沙棘生物量积累减少,同时引起沙棘失叶、枯枝,严重的引起枯死,而对枯死衰弱林分的改造,又使得沙棘林地面积减少,对于这些变化,采用遥感技术进行区域沙棘灾害监测,具有很强的优越性。从反射特性看,TM图像的每个像元点是地面30 m×30 m范围内各种地物的综合反射结果^[12]。沙棘在进入旺盛生长期后,由于大量根蘖苗的出现,其林分盖度可达100%,叶绿素含量及枯枝量决定了沙棘林分的光谱特性,而受害沙棘由于树叶褪色和枯枝大量出现,使其光谱综合反射能力较之健康植被明显降低。研究表明,植物光谱中近红外波段和可见光中的红光波段两个最典型的波段值的不同组合与植被间有较好的相关关系,因此,通常用对植被敏感的红光、近红外波段的反射率比值(即植被指数)来提取植被信息。植被指数综合反映了相互关联且密不可分的3个植被参数(生物量、灾害、水分含量)^[11, 17],用来定量探查沙棘的受灾情况。但是,由于太阳高度角、观测角度与地表倾斜等因素会引起植被反射的变化^[18],为了消除影响,先后有几十种植被指数被提出与应用^[19]。常用于植被遥感监测的是NDVI(Normalized difference vegetation index),又称标准化植被指数。NDVI的计算公式为: $NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + \rho_{RED})$ 。其中, ρ_{NIR} 是近红外波段, ρ_{RED} 是红光波段。NDVI通过对反射率的组合运算提高了土壤背景的鉴别能力,同时消弱了大气和地形的影响,当植被覆盖度低于15%时,NDVI稍微大于裸地;植被覆盖度为25%~80%时,NDVI与植被覆盖度呈线性关系;当植被覆盖度进一步增加,NDVI达到饱和对植被覆盖度增加不敏感^[10, 16]。而土壤水分与沙棘的生长状况有着密切的关系^[21]。不难看出,NDVI更适合高叶面积植被指数的遥感监测,建平县境内8 a生以上的沙棘人工林盖度几乎可达80%左右,非常适合使用NDVI进行植被指数变化监测。同时,利用同季相像元的NDVI多年时间序列资料更加有利于消除植被季节变化的影响。剔除伪变化信息后,利用所提取的结果对植被的动态变化信息进行掩模处理,得到森林植被减少和增加的信息,再结合当地灾情资料,可确定沙棘受灾程度的临界值。

2 结果与分析

2.1 多年辐射值分析

通过影像文件同数字林相图和数据库的结合,可提取出样地像元各波段值,为了消除地面定点、图像几何校正及周边像元的影响,提取样地中心为3×3共9个像元的TM数据值,并求其算术平均值作为样地的反射值。通过对40个样地共360个像元的TM数值分析,绘制出1991~2004年反射值光谱曲线(图2)。健康沙棘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蓝光(约480 nm)、红光(约670 nm)处形成两个低谷和一个“绿峰”(560 nm)^[18, 22],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。当沙棘林受害后,其光谱曲线呈现红光区

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,如图2中波段3附近,随年代增加反射值逐渐增加,2004年达到最高;近红外区的绿色反射率则显著降低,且受害程度越重,反射率愈低,如图2中波段4附近,随年代增加反射值呈现降低趋势.通过分析,可以看出40个样地的沙棘光谱随年份变化而呈现有规律变化,正是由于不同时相上沙棘的光谱特性差异,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沙棘灾害的理论基础.

2.2 多年植被指数分析

2.2.1 植被指数的变化分析 根据TM影像数据以及1:50 000建平县地理信息系统资料,分别计算1991、1993、1997、2001、2004年实验区(罗福沟乡、建平镇、杨树岭乡)的归一化植被指数(NDVI),其统计信息见表1.在40个样地中,选择23个常灾区进行NDVI值的动态监测,求各年23个样地的平均值,得到NDVI时间序列变化曲线,并进行线性回归分析(图3), R^2 为0.79,趋势线具有较好的拟合度.可以看出,从1991年8月到2004年8月,植被指数大体上具有减小趋势,到2001年达到最小,2004年略有增加.其原因主要是由于沙棘木蠹蛾为4 a一代跨5个年度,在20世纪90年代初期,大部分沙棘林进入旺盛生长期后,但土壤水分无法满足其旺盛生长需要,因此大部分栽植在丘陵缓坡地上的沙棘林分提前出现衰退,为沙棘木蠹蛾的发生创造了条件.作者在建平县调查时发现,同一年份栽植在河岸边的沙棘林生长旺盛,树体高达7~8 m,呈现明显的乔木化特征.而2004年左右出现NDVI值的升高,经现场调查主要是由于次生植物在沙棘衰退枯死后,大量繁

殖生长引起的.通过初步的统计分析,说明沙棘灾害胁迫引起的绿色生物量和生长势的变化在TM遥感图像上有明显的反映.

2.2.2 沙棘林受灾程度分析 据调查,1991年沙棘生长良好,因此以1991年的NDVI图作为研究区健康沙棘底图,分别与1993、1997、2001、2004年的NDVI图相减,得到40个样地的NDVI平均值,如图4,差值为正表示NDVI值增加,说明沙棘未受危害;而沙棘受害必反映在NDVI值的下降,差值为负,且下降幅度与受害程度有关^[22].1993~1991年与1997~1991年的NDVI差值曲线下降幅度明显小于2001~1991年和2004~1991年的差值曲线.依据地面详查数据,结合当地森保部门提供的灾情资料,确定各受灾程度的NDVI临界值,以NDVI下降至或小于0.1为轻度受灾区,NDVI下降至0.1到0.25为中等受灾区,NDVI下降幅度大于0.25为严重受灾区.经统计(表2),1993年NDVI浮动幅度较小,其中70%的样地NDVI呈现下降,但均为轻度受灾区;1997年受灾幅度变大,轻度受灾区占50%,中等受灾区占30%,无严重受灾区;2001年受灾范围与幅度扩大,其中严重受灾区占52.5%,中等受灾区占45%;2004年严重受灾区占7.5%,中等受灾区占72.5%,受灾程度减缓.根据野外验证,2004年一些严重受灾区被误判成

表1 建平县东北部实验区多年NDVI值统计比较

Table 1 Comparison of NDVI statistics of the study area in Jianping in 1991, 1993, 1997, 2001 and 2004

年份 Year	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 Std. Dev
1991	-0.4353	0.6738	0.312	0.128
1993	-0.4546	0.6290	0.308	0.123
1997	-0.1071	0.6697	0.341	0.121
2001	-0.1333	0.5593	0.254	0.107
2004	-0.1385	0.7073	0.362	0.130

表2 40个样地区受灾程度统计

Table 2 Statistics of damage degrees in 40 sampling sites

年份 Year	样地个数 Numbers of Sampling sites			
	未受灾 No damage	轻度受灾 Mild damage	中等受灾 Moderate damage	严重受灾 Heavy damage
1993	12	28	0	0
1997	8	20	12	0
2001	0	1	18	21
2004	2	6	29	3

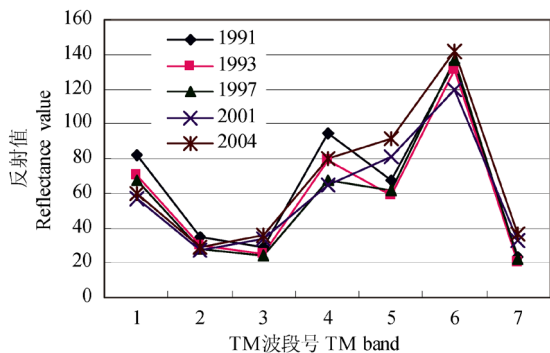


图2 多时相沙棘光谱曲线比较

Fig. 2 Comparison of spectral reflectances for multi-temporal TM images

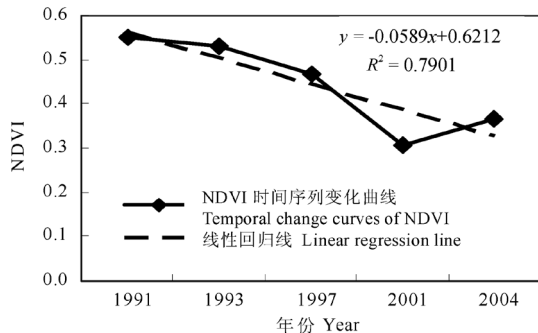


图3 植被指数时间序列变化曲线

Fig. 3 Temporal change curves of NDVI from 1991 to 2004

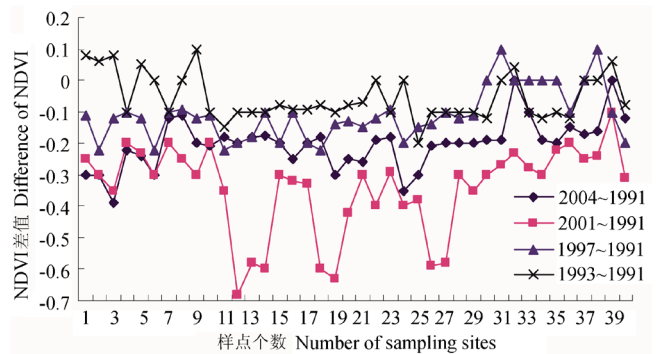


图4 40个样地2004、2001、1997和1993年NDVI与1991年的差值变化曲线

Fig. 4 The threshold changes of NDVI of 2004, 2001, 1997 and 1993 minus that of 1991 in 40 sampling sites

中度受灾区和轻度受灾区,其原因是在受灾区沙棘林死亡后次生植被生长茂盛,使得NDVI增加。

2.3 沙棘空间分布变化

基于光谱特征和地理环境状况的基本分析,在TM4、3、2假彩色合成影像上建立影像判读的解译标志。其中沙棘林的影像特征表现为边界比较模糊,形状不规则,呈深红色、红色调,影像结构比较粗糙,其中颜色越鲜艳说明叶绿素和植被盖度高;而受害沙棘由于近红外波段对叶绿素的反射明显降低,呈深绿色色调。根据解译标志,将研究区土地利用类型划分为耕地、林地(沙棘)、水域、居民点及工矿用地、以及未利用地(荒草地、裸地等)。经解译结果统计,研究区(罗福沟乡、建平镇、杨树岭乡)沙棘总面积为586.51 km²,主要分布于各乡镇的山坡地带,整体与耕地相间分布。1991~2004年期间沙棘总体呈减少趋势,约106.26 km²,主要位于罗福沟乡北部、建平镇北部、西南部以及杨树岭乡中部及南部等地区。对比实地调查数据和以往土地利用与覆盖现状图,监测结果基本一致,精度在75%左右。

由于1991年与1993年沙棘生长状态良好,可比意义不大,而从1997年开始沙棘木蠹蛾大面积暴发,因此选择1991年、1997年、2004年分析沙棘空间变化特征(图5)。从1991~1997年的地表覆盖类型变化统计出,沙棘面积净减少了约46.78 km²,其中沙棘增加面积为18.47 km²,主要为耕地向沙棘的转变,占有沙棘增加面积的90.53%;而沙棘减少面积为65.24 km²,主要表现为沙棘向未利用地(荒草地、裸地等)和耕地的转变,分别占有沙棘减少面积的53.83%与43.47%,说明沙棘木蠹蛾暴发后,一部分沙棘枯死后成为荒地,一部分被利用开发为耕地;从空间上看,1991~1997年沙棘减少主要

发现于罗福沟乡北部和东南部,建平镇东部和中西部,以及杨树岭乡北部、东部与东南部(图5-A)。与1991~1997年相比,1997~2004年沙棘净减少面积增多,约59.48 km²,其中新增沙棘面积为29.41 km²,主要为耕地、未利用地(荒草地、裸地等)向沙棘转化,占沙棘新增面积的47.26%和49.99%;沙棘减少面积为88.89 km²,主要表现为沙棘向未利用地(荒草地、裸地等)与耕地的转化,分别占沙棘减少面积的52.70%与45.48%;沙棘减少的空间分布在1991~1997年基础上有所扩展,主要发现于罗福沟乡东西侧和北部,建平镇中部、北部与西部以及杨树岭乡的中部、东西两侧(图5-B)。

3 讨论

从本文的研究结果看,利用TM遥感数据,与地面调查相结合建立判度特征,可反映沙棘灾害的范围和程度,监测速度、范围及成本都优于过去传统的调查方法,为大尺度、实时动态监测沙棘灾害提供了可借鉴的途径。

利用遥感图像进行沙棘灾害动态监测时,光谱反射特征以及植被指数的动态变化可作为宏观监测沙棘灾害手段。从5期遥感图像分析可知,实验区沙棘受灾程度逐年加重,面积不断扩大,这体现在1991~2004年40个样地平均NDVI值呈下降趋势,其中2001年NDVI值最低,说明沙棘在2001年时呈现的受害特征已经非常显著,但这一受害特征是多年灾害胁迫的积累效应,是一个从量变到质变的过程,因此,更早的灾害动态特征的捕捉,仍将有待进一步研究。由于在沙棘种植区,沙棘枯死后次生植被生长茂盛,这在一定程度上使2004年受灾区植被覆盖率变大,NDVI值增加。经调查,次生植被主要为隐子草、百里香等草本植物。通过建立地面判别

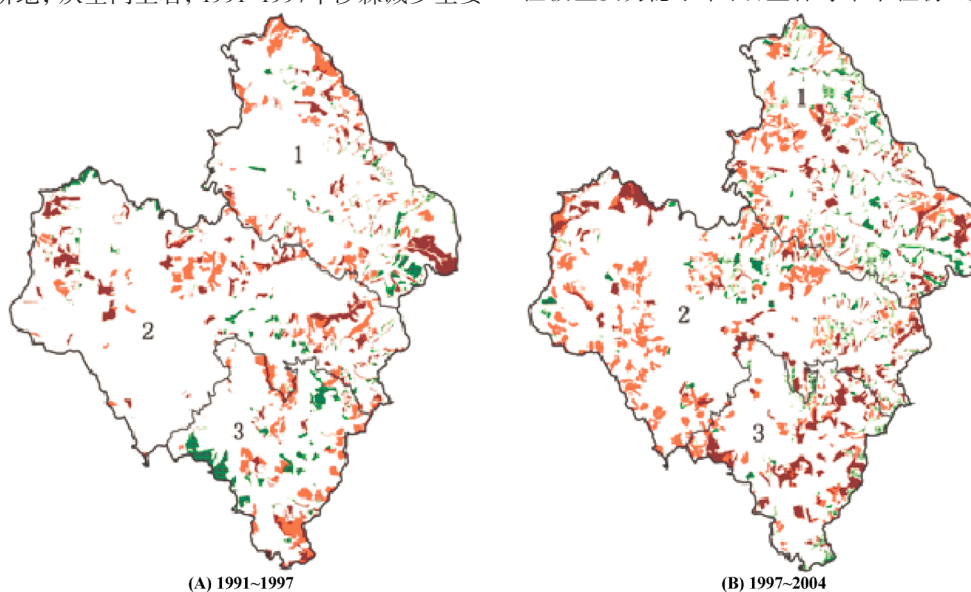


图5 1991~1997年与1997~2004年土地利用变化
Fig. 5 Changes in land use from 1991 to 1997 and from 1997 to 2004 in Northeast Jianping.

未变化; 未利用地→沙棘; 居民点及工矿用地→沙棘; 水域→沙棘; 耕地→沙棘; 沙棘→居民点及工矿用地; 沙棘→水域; 沙棘→未利用地; 沙棘→耕地. 1. 罗福沟乡; 2. 建平镇; 3. 杨树岭乡
 Unchanged; From unused land to seabuckthorn plantation; From residential and industrial land to seabuckthorn plantation; From water area to seabuckthorn plantation; From cultivated land to seabuckthorn plantation; From seabuckthorn plantation to residential and industrial land; From seabuckthorn plantation to water area; From seabuckthorn plantation to unused land; From seabuckthorn plantation to cultivated land. 1. Luofugou Township; 2. Jianping Township; 3. Yangshuling Township

标志对5期遥感图像进行解译,可以得到植被覆盖变化图以及沙棘的空间变化特征,可以看出1991年与1993年沙棘面积变化较小,这段时间沙棘木蠹蛾还没有大面积暴发. 1997年研究区沙棘木蠹蛾危害与干旱胁迫症状明显,甚至出现成片枯死现象,枯死和衰退的部分沙棘林地清理后,变为农田或裸地,这与TM遥感影像上在罗福沟乡北部和杨树岭乡西部沙棘面积减少的情况是相符的. 在2001年与2004年的TM影像上,沙棘面积不断减少,监测结果与实地调查数据基本吻合,精度在75%左右,基本能满足大面积监测的需要.

对于沙棘纯林来说,利用TM遥感数据获得的NDVI能较好地反映沙棘受灾区的植被覆盖情况,但是对于建平县低山丘陵乔灌混交护坡造林模式,以及乔木与沙棘带状或块状混交造林模式,在监测时会影响到受害程度及面积准确程度的判断. 关于沙棘木蠹蛾蛀食危害和干旱胁迫引起的复合灾害对沙棘生物量的影响,这一过程较为缓慢,而变化前后地面光谱数据本研究没有获得. 植被指数的变化受多种要素影响,如何剔除其他要素的干扰,进行沙棘受灾程度的定量监测,有待进一步研究. 另外,由于受TM影像时间分辨率的限制,只能从年际变化分析沙棘灾害的动态过程,因此,建议同时使用不同传感器和不同时相的遥感数据,即多源信息融合,可更好地发挥不同遥感源的优势.

References

- Jin ZP (金争平), Li YH (李永海), Wen XF (温秀凤), Gu YK (顾玉凯), Jin SY (金书源), Guo H (郭海). Drought influence to fruit's yields of artificial *H. rhamnoides* ssp. *sinensis* ecological forest. *Global Seabuckthorn R & D* (国际沙棘研究与开发), 2006, **4** (2): 33~40
- Zhou ZY (周章义). Causes of death and strategies to deal with *Holcocus hippophaecolus* in the east of Erdos City, Inner Mongolia Autonomous Region. *Hippophae* (沙棘), 2002, **15** (2): 7~11
- Lu CK (路常宽), Zong SX (宗世祥), Luo YQ (骆有庆). Adult behaviors and sex attraction of *Holcocus hippophaecolus*. *J Beijing For Univ* (北京林业大学学报), 2004, **26** (2): 79~83
- Tian RM (田润民), Tang MC (唐蒙昌). Preliminary study on biological characteristics of *Holcocus hippophaecolus*. *Inner Mongolia For Sci & Technol* (内蒙古林业科技), 1997 (1): 36~38
- Zhao CQ (肇承琴), Zhang YF (张玉福), Chen GZ (陈国芝). Thinking on ups and downs of one million mu seabuckthorn stands in Jianping County. *Global Seabuckthorn R & D* (国际沙棘研究与开发), 2007, **5** (2): 37~40
- Zong SX (宗世祥), Luo YQ (骆有庆), Xu ZC (许志春), Zhang JT (张金桐), Cheng XF (成小芳). Field trapping trials of sex pheromone for *Holcocus hippophaecolus* (Lepidoptera: Cossidae). *J Beijing For Univ* (北京林业大学学报), 2006, **28** (6): 113~116
- Fang YL (方宇凌), Sun JH (孙江华), Zhao CH (赵成华), Zhang ZN (张钟宁). Identification of sex pheromone components of *Holcocus hippophaecolus* (Lepidoptera: Cossidae) and their biological activities. *Acta Entomol Sin* (昆虫学报), 2003, **46** (5): 63~67
- Zong SX (宗世祥), Luo YQ (骆有庆), Xu ZC (许志春). Geostatistical analysis on spatial distribution of *Holcocus hippophaecolus* eggs and larvae. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2005, **25** (4): 831~836
- Lu CK (路常宽), Luo YQ (骆有庆), Li ZY (李镇宇). Model of disasters prediction in seabuckthorn shrubberies. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2006, **26** (2): 503~508
- Dai CD (戴昌达), Tang LL (唐伶俐), Chen G (陈刚). The theory and practice on monitoring and evaluating forestry fire, insect disaster and flood by TM. *J Remote Sensing* (遥感学报), 1993, **8** (2): 105~111
- Ekstrand S. Assessment of forest damage with Landsat TM: Correction for varying forest stand characteristics. *Remote Sense Environ*, 1994, **47** (3): 291~302
- Kaneyuki N, Yoshinori K. Assessment of pine forest damage by blight based on Landsat TM data and correlation with environment factors. *Ecol Res*, 1992, **6** (7): 9~18
- Wu HG (武红敢), Qiao YY (乔彦友), Huang JW (黄建文). Assessment of forest diseases and insects with Landsat TM data. *Remote Sensing Technol & Appl* (遥感技术与应用), 1994, **9** (4): 46~51
- Wu JY (吴继友), Ni J (倪健). Spectral characteristics of the pine leaves damaged by pine moth and a model for detecting the damage early. *Remote Sensing Environ* (环境遥感), 1995, **10** (4): 250~251
- Guo ZH (郭志华), Xiao WF (肖文发), Zhang Z (张真). Utilization of remote sensing for detecting forest damage caused by insect infestations or diseases. *J Nat Disasters* (自然灾害学报), 2003, **12** (4): 73~81
- Wu HG (武红敢), Shi J (石进). Monitoring technique of pine caterpillars with TM image. *J Remote Sensing* (遥感学报), 2004, **8** (2): 172~177
- Bradley C Rundquist. The influence of canopy green vegetation fraction on spectral measurements cover native tall grass prairie. *Remote Sensing Environ*, 2002, **81** (1): 129~135
- Dymond JY, Shepherd JD, Qi J. A simple Physical model of vegetation reflectance for standardizing optical satellite imagery. *Remote Sensing Environ*, 2001, **77** (2): 230~239
- Tian QJ (田庆久), Min XJ (闵祥军). Advances in study on vegetation indices. *Adv Earth Sci* (地球科学进展), 1998, **13** (4): 327~333
- Ji R (季荣), Zhang X (张霞), Xie BY (谢宝瑜). Use of MODIS data to detect the oriental migratory locust plague: A case study in Nandagang, Hebei Province. *Acta Entomol Sin* (昆虫学报), 2003, **46** (6): 713~719
- Ruan CJ (阮成江), Xie QL (谢庆良). Effect of soil moisture on survival rate of *Hippophae rhamnoides* L. and its stress resistance physiological characteristics. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2002, **8** (4): 341~345