电子与信息工程、管理工程

文章编号：1000-8608(2011)03-0422-06

湿地生态系统状态参数遥感估算与分析

姚 为，韩 敏*

（大连理工大学 电子与信息工程学院，辽宁 大连 116024）

摘要：综合利用遥感图像处理技术和定量遥感模型，计算分析了扎龙湿地不同时期的植被指数和蒸散发量信息，研究了2001年火灾前后湿地植被生长状况的时间变化和空间差别.实验通过计算蒸腾量与植被指数的比值，来描述地面植被在不同生长阶段生长速度的差别，并利用图像变化检测技术，获取了火灾受灾区空间分布情况的相关信息.实验结果表明，在火灾中湿地生态系统受到大面积破坏，受灾最严重的是芦苇生长区；湿地植被规模锐减，而未被烧毁植被的生长速度则没有受到直接影响；由于补水措施的及时，整个生态系统在灾后总体恢复情况理想.

关键词：湿地；生态环境；植被指数；蒸散发量

中图分类号：TP79 **文献标志码：**A

0 引 言

遥感技术用于生态系统监测，是研究生态系统发展变化规律的有效途径[1~3].利用遥感地物分类技术，可以获取生态系统的组成信息和不同类型植被空间分布情况，利用定量遥感技术计算地表的生物物理量，还能进一步得出与生态系统生命活动情况相关的时空信息.刘志丽等[4]通过遥感地物分类，对新疆塔里木河中下游流域11 a的生态环境变化情况进行了研究，分析了变化原因.Han等[5]根据地物类型的变化，对扎龙湿地生态环境变化情况进行了研究，并分析得出湿地生态系统组成变化的驱动因素.孙建国等[6]根据1998年到2005年SPOT植被指数的变化，对黄土高原的植被退化情况做了评价.

本文在计算地表植被指数的基础上，利用扎龙湿地不同时期的12幅TM/ETM+卫星图像，计算湿地地表水分蒸散发量和湿地植被水分蒸腾量，并以蒸腾量与植被指数的比值作为植被生长速度的评价指标.

1 定量遥感模型算法

1.1 植被指数及植被覆盖率

植被指数类型多样，根据Rouse等[7]提出的归一化植被指数$NDVI$的定义，利用TM/ETM+第3和第4波段数据得到的地表红光和近红外反射率信息，对两波段的反射率进行综合：

$$NDVI = \frac{r_{\mathrm{nir}} - r_{\mathrm{red}}}{r_{\mathrm{nir}} + r_{\mathrm{red}}} \tag{1}$$

其中r_{nir}和r_{red}分别表示近红外波段和红光波段的地表反射率.

植被指数本身的物理含义比较抽象，然而植被指数与叶面积指数以及植被覆盖率都有正相关性，可以作为植被茂盛程度的一个度量.植被指数与植被覆盖率间的经验关系，也是计算植被覆盖率的一个主要依据.Choudhury等[8]给出了一种在后来被广泛引用的植被覆盖率的算法：

$$f_{\mathrm{c}}(0) = 1 - \left(\frac{NDVI_{\max} - NDVI}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}}\right)^{p} \tag{2}$$

其中$NDVI_{\max}$和$NDVI_{\min}$分别为区域内植被指数的最大和最小值；$p = \frac{\Lambda}{k}$，k为消光系数[8]，取值为0.3～0.6，Λ描述植被叶片的方向分布，在均匀分布时$\Lambda = 0.5$；$f_{\mathrm{c}}(0)$是观测天顶角为0°时的像元植被覆盖率，对于观测天顶角变化较小的TM/ETM+卫星图像，可以忽略角度差别，认为

收稿日期：2008-03-04； **修回日期：**2010-04-04.
基金项目：“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAB14B05)；“九七三”国家重点基础研究发展计划资助项目(2006CB403405)；国家自然科学基金资助项目(60674073).
作者简介：姚 为(1983-)，男，博士生；韩 敏*(1959-)，女，教授，博士生导师，E-mail：minhan@dlut.edu.cn.

$f_c = f_c(0)$.

1.2　地表蒸散发量

能量平衡方法是由遥感图像估算地表蒸散发量的一类主要方法[9~11]. 此类方法用能量平衡方程来描述地表能量的分配：

$$R_n = H + \lambda ET + G + P \tag{3}$$

式中：R_n 表示净辐射能量；H、λET 和 G 分别表示单相热通量、相变热通量和土壤热通量；P 表示植被光合作用的能量消耗.

忽略相对较小的光合作用能量消耗 P，解能量平衡方程的关键是计算等式中的单相热通量项，其根据地气温差与空气阻抗之比来计算：

$$H = \rho c_p \frac{dT}{R_a} \tag{4}$$

式中：ρc_p 表示空气的单位体积热容；dT 表示地表与近地空气的温度梯度；R_a 为近地空气层的热阻抗.

由遥感算法得到的地表辐射温度与地表热动力学温度通常存在区别，而地表空气温度的高低也有空间差异，简单地将地表辐射温度与气象站测量的空气温度做差来计算地气温差，会带来较大的误差. 利用 SEBAL 模型[12,13] 中的“冷热点”方法求地表辐射温度与地气温差间的近似线性关系，则可以避免这个问题.

在计算出单相热通量、土壤热通量以及净辐射能量之后，就得到了代表蒸散发强度的相变热通量. 依据经验关系对卫星过境时刻地表的蒸散发强度数据进行推广，就可以得到 1 d 内蒸散发的累积量[14].

1.3　植被蒸腾量

为了在蒸散发总量中分离出反映植被蒸腾作用大小的蒸腾量部分，需要建立双层地表结构模型[15,16]，用植被层和下垫面层（土壤或水面）来分别描述两个不同的蒸散发源，并近似地认为来自植被冠层的蒸散发量全部由植被的蒸腾作用产生.

首先基于双层结构模型对下垫面层和植被层分别构造能量平衡：

$$R_{ns} = H_s + \lambda ET_s + G \tag{5}$$

$$R_{nc} = H_c + \lambda ET_c \tag{6}$$

其中 R_{ns}、H_s、λET_s 表示下垫面的净辐射能量、单相热通量和相变热通量；R_{nc}、H_c、λET_c 表示植被层的净辐射能量、单相热通量和相变热通量.

两个能量平衡的各项和 SEBAL 模型的能量平衡的各项相对应，可以将 SEBAL 模型的能量平衡项看作双层模型中能量平衡对应项的总和. 因此可以基于 SEBAL 模型的计算结果对双层模型进行求解.

首先利用 Lambert-Beer 定律对地表净辐射总量进行分割，得到植被层和下垫面层各自的净辐射能量. 根据 Priestley-Taylor 公式[17] 计算植被层相变热通量的饱和值，并将其作为初值，

$$\lambda ET_c = a_{PT} \cdot f_c \frac{S}{S+\gamma} R_{nc} \tag{7}$$

式中：a_{PT} 为 PT 参数（常数）；S 为饱和水气压对温度的变化率；γ 为干湿球常数.

将由 SEBAL 模型计算得到的单相热通量总量作为已知，得到方程

$$H = H_c + H_s \tag{8}$$

求解式(5)～(8)组成的方程组，并根据日间相变热通量非负的约束条件对计算结果进行更新，得到下垫面层和植被层的相变热通量计算结果.

植被层相变热通量的计算结果反映了卫星过境时刻，地表植被蒸腾作用的强度. 基于蒸发比日间恒定的先验知识，可以计算出 1 d 内地表植被蒸腾总量.

2　实验数据

扎龙自然保护区位于黑龙江省西部松嫩平原，是亚洲最大的湿地之一. 扎龙湿地是丹顶鹤等珍稀鸟类的栖息地，在调节地区干旱气候等方面发挥着重要作用[18].

2001 年 8 月至 10 月由于干旱缺水保护区发生了火灾，大片芦苇被烧毁，湿地生态系统受到严重的破坏[19]. 本文研究的目的就是从区域尺度上分析湿地自然保护区遭受火灾破坏的程度，了解芦苇生态系统在灾后的恢复情况，因此利用遥感技术，对全区域的植被指数和蒸散发量在火灾前后的变化进行研究.

研究中选取扎龙湿地 1998 年到 2002 年间的 12 幅 TM/ETM+ 卫星图像计算植被指数和蒸散发量. 气象数据来自齐齐哈尔气象站的日气象数据集. 卫星的过境时刻是当地时间下午 2 点，因此选取日最高气温和日最低空气湿度作为过境时刻的空气温湿度数值. 湿地的构成以芦苇沼泽为主，周边是一些农田，根据 2002-07-04 的卫星遥感图像绘制的全区域的地物类型分布图如图 1 所示.

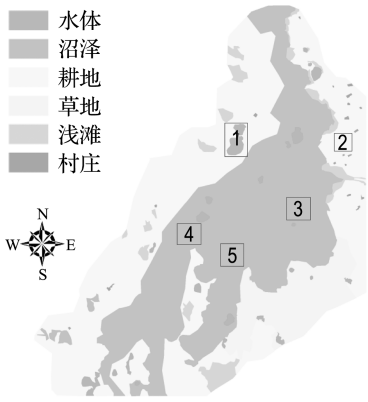


图 1 扎龙湿地土地利用图

Fig. 1 Land use map of Zhalong wetland

3 实验结果数据分析

3.1 植被指数和蒸散发量

算法模型得到对应遥感图像像元尺度的地表参数估算结果以图的形式给出. 图 2 给出了 2002-07-04、2002-09-22 和 2002-10-08 蒸散发量的计算结果,各像元的蒸散发量大小区别表示为色温的差别.

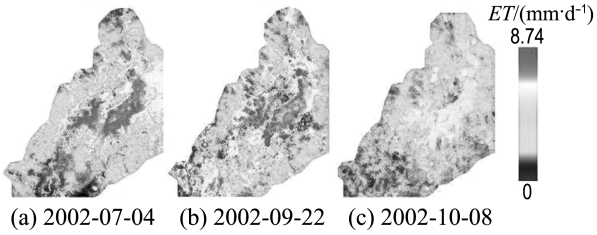


图 2 日蒸散发量计算结果的示意图

Fig. 2 Schematic map of daily evapotranspiration estimates

表 1 给出了 12 d 的植被指数以及蒸散发量的计算结果,其中 ET、T 分别表示日蒸散发量和日蒸腾量. 列出的数据对应着图 1 所示全区域所有像元的平均值,是对湿地植被生态系统和湿地周边农田生态系统的整体描述:植被指数平均值对应区域生物量的总体规模;蒸散发量反映了全区域的整体水分消耗情况;蒸腾量则描述了各类植被生命活动强度的整体水平.

为验证本文算法模型的可靠性,将其与广泛应用的双源模型(TSM)算法[20]进行比较. 表 2 列出两算法得到的 1999-10-08 计算结果相对误差的均值和标准差,这些统计值反映了误差的总体水平. 12.7%和 1.0%的平均相对误差表明,本文模型与经典 TSM 有较好的一致性.

表 1 扎龙湿地植被指数及蒸散发量的区域均值

Tab. 1 Regional averages of *NDVI* and daily evapotranspiration in Zhalong wetland

日期	*NDVI*	*ET*/(mm·d^{-1})	*T*/(mm·d^{-1})	(*T*/*NDVI*)/(mm·d^{-1})
1998-05-14	0.169	2.736	0.869	5.142
1999-10-08	0.223	2.641	0.724	3.247
2000-09-24	0.338	3.061	1.471	4.352
2001-04-28	0.139	3.610	0.569	4.094
2001-10-05	0.197	1.481	0.547	2.777
2001-10-21	0.150	1.175	0.334	2.227
2001-11-22	0.131	0.798	0.206	1.573
2002-04-15	0.130	3.444	0.507	3.900
2002-05-17	0.159	3.376	0.923	5.805
2002-07-04	0.288	2.860	1.391	4.950
2002-09-22	0.281	2.599	1.189	4.231
2002-10-08	0.187	2.496	0.590	3.155

表 2 两算法间的相对误差

Tab. 2 Deviation between the two algorithms

误差	均值/%	标准差/%
蒸腾量	12.7	24.5
蒸发量	1.0	4.3

3.2 时间变化分析

利用表 1 的数据绘制植被指数的变化曲线如图 3 所示. *NDVI*′表示 2001 年 4 月及此前的植被指数,反映了火灾之前的情况.

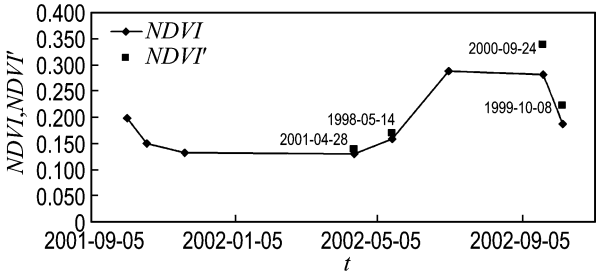


图 3 归一化植被指数的时间变化曲线

Fig. 3 Seasonal changes of normalized *NDVI*

由图 3 可以看出,在春季灾后的植被指数较往年的差别不大,而在夏秋季则出现较大落差. 分析认为,受到火灾破坏最严重的是湿地芦苇,而 5 月中旬芦苇仍未开始生长,植被指数的升高来自于周边农作物等陆生植物的贡献,这些陆生植物并未直接受到火灾的影响,因此,1998 年和 2002 年 5 月份的植被指数体现出了一致性. 而在 9 月份植被指数的明显差别,则反映出了大火对湿地芦苇生态系统产生了严重的破坏.

图 4 则给出了湿地蒸散发量和蒸腾量的变化

情况. 标记为 ET' 和 T' 的数据点对应火灾之前的数据. 比较 1999-10-08 和 2001-10-05 的情况，区域平均蒸散发量下降超过 40%，火灾的破坏非常明显；而经过 1 a 的恢复，到 2002-10-08，蒸散发量已回升到 2.496 mm，和 1999-10-08 的情况已经很接近了. 2001-04-28 的蒸散发量与 2002-04-15 和 2002-05-17 相比，并没有出现明显下降，这同样是由于在 4、5 月份，湿地芦苇还没有开始强烈的生命活动，这一阶段蒸散发量主要来自于地表蒸发与湿地周边农作物蒸腾作用的贡献，而这两个蒸散发源受火灾的影响较小，因此，这一阶段湿地的蒸散发量在灾后和灾前较接近.

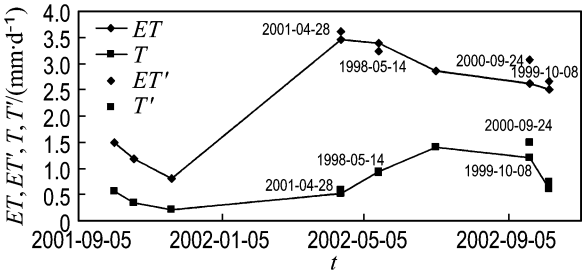


图 4　区域蒸散发量以及植被蒸腾量的时间变化曲线

Fig. 4　Seasonal changes of regional evapotranspiration and transpiration

为进一步分析不同类型地物在灾后恢复期间的状态变化，选取了 5 个特征子区域，对应着 3 个芦苇生长区、1 个作物生长区，以及 1 个湖面区域，子区域的位置在图 1 中做了标示. 对特征子区域的蒸散发量计算结果进行区域平均，并分析其时间变化，如图 5 所示. 3 个芦苇生长区的蒸散发量在初期的差别反映出了不同区域火灾破坏程度的差别，而随后表现出来的较一致的整体回升趋势反映出了芦苇生态系统的恢复过程.

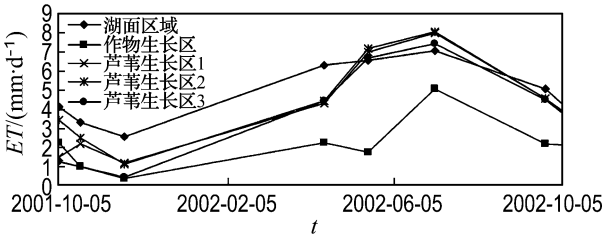


图 5　特征子区域蒸散发量的变化曲线

Fig. 5　Seasonal changes of daily evapotranspiration in different sub regions

图 6 给出了 $T/NDVI$ 随时间的变化情况. Running 等[21]指出，像元植被指数和像元对应区域内叶绿素是正相关的，$NDVI$ 可以用来衡量地表绿色植被的生长规模. 区域蒸腾量大小能反映不同时期生态系统的总体耗水量. 然而在生长周期的不同阶段，植被规模有较大区别，计算区域蒸腾量与植被指数比值的意义就在于实现对不同时期植被蒸腾强度在同等规模下的比较，将该比值作为植被生长速度的度量.

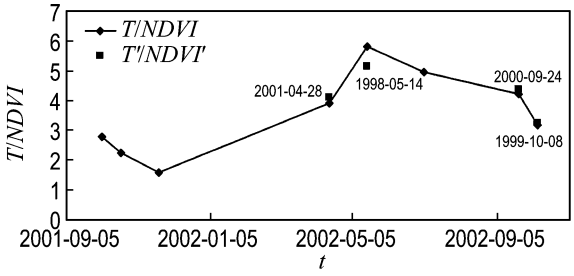


图 6　$T/NDVI$ 的时间变化曲线

Fig. 6　Seasonal changes of $T/NDVI$

由图 6 可以看出 $T/NDVI$ 变化的两点规律：(1)该比值在生长周期内的不同阶段变化明显，反映出了植被在生长周期各阶段生长速度的变化；(2)在受灾年份和正常年份的同一时期，该比值基本保持不变甚至在 5 月份还有一定程度的升高.

火灾直接影响的是植被的规模，而植被的生长速度主要由物候决定，火灾的影响是非直接的. 不同类型植被的生长速度有区别，而火灾对湿地区域各个组成部分的不均匀破坏，会改变整个区域生态系统的植被组成，从而会对区域植被的整体生长速度造成间接影响.

3.3　图像变化检测和灾害空间信息

为更具体地了解灾害对湿地生态系统破坏作用的空间差别，对地表蒸散发量的计算结果影像进行变化检测. 前期配准及其他预处理在 Erdas Imagine9.0 软件环境下实现. 变化检测的算法主要是比值法和差值法[22]，本文根据时间先后顺序对蒸散发量的计算结果做差，得到日间蒸散发量的差值图像.

对 1999-10-08、2001-10-05 与 2002-10-08 的蒸腾量计算结果进行变化检测，以了解受灾区域的分布情况，并分析灾后 1 a 时间里，受到破坏的湿地生态系统各不同区域的恢复情况.

图 7 是 1999-10-08 和 2001-10-05 的蒸散发量计算结果的差值图像. 图中的红色区域(深色区域)表示蒸散发量下降程度大的区域，对应着火灾

最严重的区域. 主要受灾区是区域中部的芦苇湿地,即扎龙湿地的核心区域;周边农田受到火灾的影响可以忽略.

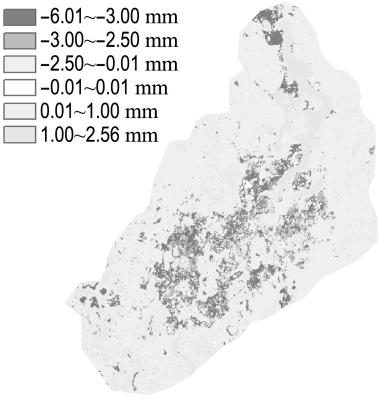


图 7 火灾引起的蒸散发量变化

Fig. 7 Evapotranspiration change caused by the fire

图 8 是 2001-10-05 和 2002-10-08 扎龙湿地区域蒸散发量的对比. 深绿色区域(深色区域)代表蒸散发量的主要增长区域,主要分布在芦苇湿地生长区,和图 7 所示火灾的重灾区有很大程度的重合. 这再次说明火灾主要破坏了芦苇湿地,同时也表明到 2002 年年底时,遭到破坏的芦苇湿地生态系统已经得到了很好的恢复.

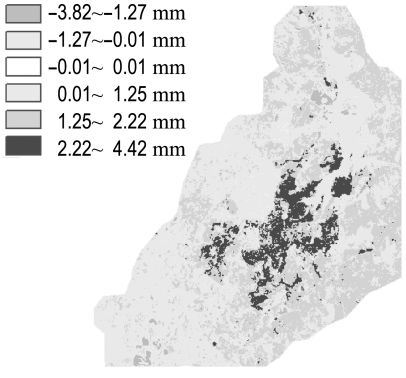


图 8 灾后恢复过程中的蒸散发量变化

Fig. 8 Evapotranspiration change after the fire

4 结 语

本文通过遥感反演方法,得到扎龙湿地地表植被指数和蒸散发量的空间分布和时间变化,研究了 2001 年火灾对湿地生态系统的破坏程度和范围,及灾后生态系统的恢复情况. 实验中结合单层和双层模型构造蒸散发量算法,实现了对植被蒸腾量的提取. 然后计算蒸腾量与植被指数的比值,以此作为植被生长速度的评价指标. 在此基础上,还利用图像变化检测技术分析了火灾受灾区的空间分布情况. 本文的实验证明了这种对多个地表参数进行遥感反演和综合分析的方法,是研究陆地生态系统生命活动和发展变化的有效途径.

参考文献:

[1] VIEDMA O, MELI J, SEGARRA D, *et al*. Modeling rates of ecosystem recovery after fires by using landsat TM data [J]. **Remote Sensing of Environment**, 1997, **61**(3):383-398

[2] LAWRENCE R L, RIPPLE W J. Calculating change curves for multitemporal satellite imagery: Mount St. Helens 1980-1995 [J]. **Remote Sensing of Environment**, 1999, **67**(3):309-319

[3] ALMEIDA-FILHO R, SHIMABUKURO Y E. Digital processing of a Landsat-TM time series for mapping and monitoring degraded areas caused by independent gold miners, Roraima State, Brazilian Amazon [J]. **Remote Sensing of Environment**, 2002, **79**(1):42-50

[4] 刘志丽,马建文,陈 嘻,等. 利用 3s 技术综合研究新疆塔里木河流域中下游 11 年生态环境变化与成因 [J]. 遥感学报, 2003, **7**(2):146-152

[5] HAN M, SUN Y N, XU S G. Characteristics and driving factors of marsh changes in Zhalong wetland of China [J]. **Environmental Monitoring and Assessment**, 2007, **127**(1):363-381

[6] 孙建国,艾廷华,王 沛,等. 基于 NDVI-气候变量特征空间的植被退化评价 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, **33**(6):573-576

[7] ROUSE J W, HAAS R H, SCHELL J A, *et al*. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS [C] // **Third Earth Resources Technology Satellite-Symposium**. Washington D C: NASA, 1974

[8] CHOUDHURY B J, AHMED N U, IDSO S B, *et al*. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations [J]. **Remote Sensing of Environment**, 1994, **50**(1):1-17

[9] COURAULT D, SEGUIN B, OLIOSO A. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches [J]. **Irrigation and Drainage Systems**, 2005, **19**(3):223-249

[10] ZWART S J, BASTIAANSSEN W G M. SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems [J]. **Agricultural Water Management**, 2007, **89**(3):287-296

[11] SANCHEZ J M, KUSTAS W P, CASELLES V, *et al*. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations [J]. **Remote Sensing of Environment**, 2008, **112**(3):1130-1143

[12] BASTIAANSSEN W G M, MENENTI M, FEDDES R A, *et al*. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation [J]. **Journal of Hydrology**, 1998, **212-213**:198-212

[13] BASTIAANSSEN W G M, PELGRUM H, WANG J, *et al*. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 2. Validation [J]. **Journal of Hydrology**, 1998, **212-213**:213-229

[14] HOEDJES J C B, CHEHBOUNI A, JACOB F, *et al*. Deriving daily evapotranspiration from remotely sensed instantaneous evaporative fraction over olive orchard in semi-arid Morocco [J]. **Journal of Hydrology**, 2008, **354**(14):53-64

[15] NORMAN J M, KUSTAS W P, HUMES K S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature [J]. **Agricultural and Forest Meteorology**, 1995, **77**(34):263-293

[16] KUSTAS W P, NORMAN J M. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover [J]. **Agricultural and Forest Meteorology**, 1999, **94**(1):13-29

[17] PRIESTLEY C H B, TAYLOR R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters [J]. **Monthly Weather Review**, 1972, **100**:81-92

[18] 殷志强,秦小光,刘嘉麒,等. 扎龙湿地的形成背景及其生态环境意义 [J]. 地理科学进展, 2005, **25**(3):32-38

[19] 孔　博,张树清,张　柏,等. 扎龙湿地火烧严重度分析及火灾对丹顶鹤生境的影响 [J]. 湿地科学, 2007, **5**(4):348-355

[20] TIMMERMANS W J, KUSTAS W P, ANDERSON M C, *et al*. An intercomparison of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) and the two-source energy balance (TSEB) modeling schemes [J]. **Remote Sensing of Environment**, 2007, **108**(4):369-384

[21] RUNNING S W, JUSTICE C O, SALOMONSON V. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS [J]. **International Journal of Remote Sensing**, 1994, **15**(17):3587-3620

[22] 马国锐,李平湘,秦前清. 基于融合和广义高斯模型的遥感影像变化检测 [J]. 遥感学报, 2006, **10**(6):847-853

Estimation and analysis of wetland ecosystem state parameters via remote sensing technique

YAO　Wei,　HAN　Min*

(School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Using quantitative remote sensing and image processing techniques, a comprehensive analysis upon information about regional vegetation index and evapotranspiration of Zhalong wetland was achieved, and the temporal change and spatial variation of vegetation conditions in Zhalong wetland before and after the fire in 2001 were studied. In the course of the experiments, ratios of transpiration and vegetation index were calculated as a description for the changes of growth rate of wetland vegetations. Then, image change detection was applied to obtaining information about spatial distribution of the fire damage. Experimental results show that the Zhalong wetland ecosystem is badly damaged by the disaster and those reed marsh regions suffer the most; the growth pattern of wetland reeds has not been affected significantly though the amount is sharply reduced. Fortunately, due to the prompt water supplement measures, post-disaster restoration for the whole wetland region is satisfactory.

Key words: wetland; ecological environment; vegetation index; evapotranspiration