

文章编号: 1007-4619 (2001) 02-0081-05

非单一地表对 AVHRR 图像计算所得蒸散的影响分析

颜春燕^{1, 2}, 牛 铮², 王长耀², 王 汶², 李湘阁¹

(1. 南京气象学院 环境科学系, 江苏 南京 210044; 2. 中国科学院 遥感应用研究所, 遥感信息科学开放研究实验室, 北京 100101)

摘 要: 针对中国人多地碎的特点, 将 AVHRR 图像和高空间分辨率图像配准, 利用一种气象-遥感综合模型分别计算 AVHRR 像元整体及对应高分辨率图像中作物区的蒸散, 给出两者之间的差异, 分析并检验利用 AVHRR 图像计算大区域蒸散中由非单一地表产生的误差, 并给出一种适用于所研究区域的相应的统计订正方法。

关键词: 高分辨率; AVHRR; 蒸散

中图分类号: TP701/TP79 **文献标识码:** A

1 引 言

蒸散是研究农田水分平衡的一个重要因子, 蒸散信息在灌溉的时间控制中非常重要, 常被用来估算土壤水分的损耗。遥感技术的发展为大面积估算作物蒸散提供了一种非常有用的手段, 它可以摆脱常规的计算蒸散的方法(即利用点上的资料测算蒸散), 减少定点测量带来的地区性误差。

目前, 利用卫星遥感技术计算农田蒸散的研究正在日益深入, 建立了许多有实用价值的模型。Brown 和 Rosenberg 根据能量平衡-作物阻抗原理提出了一个作物阻抗-蒸散模型^[1], 为热红外遥感温度应用到蒸散模型提供了理论依据; Idso 等人发展的用遥感估算潜在蒸散的经验模型, 可以估算 24 小时蒸散率^[2]; Jackson 等人在 1977 年建立了每日一次热红外冠层-空气温度差与日蒸散的统计模型^[3]。Seguin 等人研究了用卫星获得的中午地表温度估算每日蒸发^[4]。在国内, 田国良等人对前人发展的模型进行了适当修改, 提出了地表温度日变化轨线, 计算逐时蒸散, 同时也讨论了日蒸散量与下午 2 时地表辐射温度和气温差及空气动力学阻抗的关系^[5]; 李付琴等人对冠层-空气温度差与日蒸散进行了统计分析, 并考虑了空气动力学阻抗对模型的影响, 研

究用每日一次的热红外温度估算日蒸散^[6]; 隋洪智等人以能量平衡为基础, 用简化的双层模型建立了一套部分植被覆盖下土壤水分和作物蒸散的监测方法^[7]。

然而, 以上的遥感模型均是采用 AVHRR 图像做为遥感数据源, 并且假设地表为单一的大面积农田, 由于 AVHRR 图像空间分辨率较低(星下点分辨率仅为 1.1 km), 从各像元获取的遥感数据反映的是该像元内各种地物的混合信息, 所计算的农田蒸散必然包含其它地物的贡献, 而对于很多地物, 例如居民点等, 研究蒸散是毫无意义的, 因此, 用上述方法计算的蒸散与实际值之间存在差异。这一问题在中国尤其突出, 较高的人口密度使得居民点遍布在一些作物主产区中, 常占到当地地表总面积的 30% 左右。本文的目的即是通过利用高空间分辨率图像单纯计算地表作物区的蒸散, 与 AVHRR 图像计算所得蒸散进行比较, 验证存在的差异, 给出差异的大小和范围, 并尝试一种用高分辨率图像订正该差异的方法。

2 蒸散计算与方法

作物冠层的能量平衡方程为

$$LE = R_n - G - H \quad (1)$$

上式中, R_n 为净辐射, G 为冠层下面的土壤热通量, H 、 LE 分别为从冠层到空气的显热通量和潜热通量, 所有通量都以 W/m^2 为单位。由于本文旨在验证非作物区存在造成的蒸散计算误差, 因此对上式各项计算和取值均作简化处理。

2.1 净辐射 R_n 的计算

$$R_n = (1 - \alpha)Q + \epsilon_a \sigma T_a^4 - \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (2)$$

(2)式右端第一项为地表吸收的太阳总辐射, α 为反照率, Q 为总辐射, 由地面气象站资料获得; 第二项为大气的长波辐射, ϵ_a 为空气发射率, σ 为斯蒂芬常数, 等于 $5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$, T_a 为气温(K), 由气象站资料获取; 第三项为地表发射的长波辐射, ϵ_s 为地表发射率, 在本文中由于研究区域主要作物水稻处于生长后期, 根据地面实际情况取为 0.97, T_s 为地表辐射温度。

计算反照率时, 采用(3)式^[7]

$$\alpha = 0.0168 \rho_{ch1} + 0.1012 \rho_{ch2} + 16.83 \quad (3)$$

ρ_{ch1} 和 ρ_{ch2} 分别为 NOAA-AVHRR 第 1 和第 2 通道的反射率。

计算空气发射率时, 采用(4)式^[8]

$$\epsilon_a = 1.24 (e_a / T_a)^{1/7} \quad (4)$$

e_a 为气温为 T_a 时的水气压(hPa)。

对于 T_s , 采用(5)式^[9]

$$\begin{aligned} T_s = & 1.274 + \left[1.0 + 0.15616 \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon} \right. \\ & - 0.482 \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^2} \left. \frac{T_4 + T_5}{2} + \left[6.26 + 3.98 \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon} \right. \right. \\ & \left. \left. + 38.33 \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^2} \right] \frac{T_4 - T_5}{2} \right] \quad (5) \\ \epsilon = & \frac{\epsilon_4 + \epsilon_5}{2}, \Delta \epsilon = \epsilon_4 - \epsilon_5 \end{aligned}$$

ϵ_4 和 ϵ_5 为已知的 AVHRR 第 4 和第 5 通道比辐射率, T_4 和 T_5 为 AVHRR 第 4 和第 5 通道的亮温。本文取 $\epsilon = \epsilon_s = 0.97$, $\Delta \epsilon = 0$ 。

2.2 土壤热通量 G 的计算

土壤热通量在有植被覆盖的条件下大大小于净辐射, 它对蒸散量计算的影响很小, 在许多计算中将其忽略不计, 因此本文中也将省略。

2.3 显热通量 H 的计算

$$H = \rho C_p \frac{(T_s - T_a)}{r_a} \quad (6)$$

ρ 为空气密度(g/m^3), C_p 为空气比热(J/gK), r_a 为空气动力学阻抗(s/m), 采用下式中的 r_a 计算^[10, 11]

$$\begin{aligned} r_a = & r'_a \left[1 - \frac{n(Z-d)g(T_s - T_a)}{Tu^2} \right] + r_{bh}, \\ r'_a = & \frac{\left(\ln \frac{Z-d}{Z_0} \right)^2}{k^2 u} \quad r_{bh} = 4/u^*, \\ u^* = & ku / \ln \left[\frac{Z-d}{Z_0} \right] \quad (7) \end{aligned}$$

式中, g 是重力加速度, 取值 $9.8 m/s$; T 为地表辐射温度和空气温度之间的平均值, Monteith 建议在田间条件下取 $n=5$ 较合适; Z 为参考面高度, 在本文中取为 $2m$; u 是参考高度 Z 处的风速; $k=0.4$ 为卡曼常数; d 是零平面位移高度; Z_0 是粗糙度长度; Monteith 认为对一般作物, 可近似用下式估算 d 和 Z_0

$$d = 0.63h, Z_0 = 0.13h$$

上式中的 h 都表示作物高度, 由地面实测资料得。

2.4 蒸散量 E 的计算

由 $LE = R_n - G - H$ 即可算出蒸散量 E ; L 为汽化潜热, 数值大小为 $2.79 \times 10^6 Wm^2/mm$ 。

由于卫星或飞机过境时获得的数据均为瞬时值, 计算的蒸散也为瞬时值, 为便于比较, 我们采用下式将瞬时值转换为全天的值^[12]

$$E = E_i^* 2N_e / (\pi \sin(\pi t / N_e))$$

式中, E_i 为任意时刻的瞬时蒸散值, $N_e = N - 2$, N 为日出至日落的时间, 即理论太阳日照时数(该数据可从当地气象站点获得), t 为从日出算起至 E_i 时刻的时间间隔。

3 遥感数据获取与处理

3.1 数据获取

本文所用高分辨率图像成像于 1999 年 7 月 23 日 10 时, 传感器为中国科学院上海技术物理研究所研制的 34 通道成像光谱仪。地点在吴江一无锡一带的水稻种植区, 该数据的地面分辨率约为 $4m$ 左右, 前 30 个通道光谱分辨率为 $20 nm$, 从第 10 到第 30 通道包含了 AVHRR 第 1 和第 2 通道的光谱范围, 第 33 和第 34 通道带宽与 AVHRR 第 4 和第 5 通道的带宽重合。图像中主要地物为水稻种植区、居民点、水体等, 共有 4 幅图像, 经纬度范围分别为:

- (1) $120^{\circ}35.58'E-120^{\circ}36.54'E$,
 $31^{\circ}05.84'N-31^{\circ}06.86'N$,
- (2) $120^{\circ}34.15'E-120^{\circ}35.21'E$,
 $31^{\circ}12.69'N-31^{\circ}13.87'N$;
- (3) $120^{\circ}14.74'E-120^{\circ}16.75'E$,
 $31^{\circ}29.66'N-31^{\circ}32.16'N$,
- (4) $120^{\circ}52.49'E-120^{\circ}54.85'E$,
 $31^{\circ}12.85'N-31^{\circ}13.39'N$.

AVHRR 图像为同一天 15 时成像,经几何订正后,地面分辨率为 1100 m 左右。

3.2 数据处理

(1) 本文所获取的 AVHRR 图像已进行了辐射纠正以及几何粗纠正,我们对该图像进行了进一步的几何精校正,本文选择研究区域 1:25 万地形图与 AVHRR 图像进行空间配准。

(2) 对于高分辨率图像,首先利用地面观测数据进行定标,定标后,前 31 个通道为反射率,32, 33 和 34 通道为辐射亮温值。然后同样利用该地区 1:1 万地形图进行了几何精校正。

(3) 对于已进行了几何精校正的 AVHRR 和高分辨率图像根据经纬度信息提取出共同的区域,并确定了 AVHRR 像元对应于高分辨率图像的范围。将高分辨率图像进行分类,本文中暂时只分为作物区和非作物区,确定 AVHRR 和高分辨率图像共同区域内 AVHRR 像元内的作物区面积比。

(4) 为了去除由于光谱分辨率不同所带来的影响,以便将来进行比较,我们根据传感器通道响应函数将高分辨率图像拟合成与 AVHRR 图像光谱一致的波段。

(5) 根据模型,带入已知参数分别求算 AVHRR 图像像元和高分辨率图像中作物区的蒸散量。

4 结果与讨论

经过对配准后的 AVHRR 和高分辨率图像查找定位,发现高分辨率图像在 AVHRR 图像上约有 40 余个像元,在此取 40 个 AVHRR 像元与对应高分辨率图像区域为研究对象。AVHRR 像元计算的蒸散值无疑是该像元的“混合蒸散”,对于每个 AVHRR 像元在高分辨率图像上的像元集合,我们取作物区内的像元的蒸散值求和并平均作为该 AVHRR 像元内作物的蒸散,显然后者更反映了地面作物区的实际情况。对于很多地物,不仅研究蒸散毫无意义,而

且由于它们的存在,使得由 AVHRR 计算的蒸散与实际值之间存在差异。表 1 列出了计算所得最终结果。限于篇幅,在此仅列出有代表性的部分值。

表 1 利用 AVHRR 和高分辨率图像计算所得各参量比较
Table 1 Comparison of parameters derived from AVHRR and high resolution images

T_{sn}/K	T_{sh}/K	$a_n/\%$	$a_h/\%$	E_n/mm	E_h/mm	$F/\%$	$A/\%$
301.2	297.5	18.3	19.4	3.61	4.30	16.0	20.4
301.9	297.4	18.0	18.9	3.33	4.33	23.1	23.3
301.5	297.1	18.3	19.3	3.37	4.36	22.4	22.5
302.4	297.6	18.5	19.4	3.43	4.28	20.0	25.8
300.8	296.6	18.1	18.9	3.59	4.45	19.4	24.2
303.1	297.8	18.0	19.1	3.21	4.27	24.8	29.8
302.0	297.4	18.2	19.1	3.56	4.42	19.4	28.3
302.6	297.8	18.0	18.9	3.31	4.28	22.5	27.4
301.7	296.1	18.3	19.4	3.34	4.51	25.9	25.2
299.3	296.4	18.5	19.5	3.72	4.47	16.8	28.9

注: T_s , a 和 E 定义如上文; 下标 n 和 h 分别表示由 AVHRR 和高分辨率图像所得; T_{sh} , a_h , E_h 均为对应于 AVHRR 像元的高分辨率图像的作物区的各值的平均; F 为相对误差,由 $(E_h - E_n)/E_n$ 算得; A 为 AVHRR 像元中非作物的面积比。

对表 1 进行分析,我们发现:

(1) 利用高分辨率图像对 AVHRR 混合像元分类,混合像元中非作物约占 20%—30%,这正说明,如果将 AVHRR 像元当作单一地表计算蒸散,其值与实际值之间必然存在误差。从表 1 可以看出由 AVHRR 和高分辨率图像计算的蒸散之间确实存在差异,相对误差约为 16%—25%。

(2) 从表 1 中我们看到由高分辨率图像反演的地表温度和反照率彼此之间相差较小,温度最多相差 2 K 多,反照率相差在 1% 左右,而由 AVHRR 图像反演的上述两个变量,虽然反照率相差也很小,这可能是由于采用了一种从实验所得的经验模型的结果,然而,地表温度相差达到 5K。这是可以解释的,高分辨率图像地面分辨率在 4m 左右,每个像元可以看作纯像元,由此反演出的参数之间应该比较接近,而 AVHRR 像元彼此之间组成不同,虽然使用了一种经验模型,仍然未能完全去除其它地物的影响。

既然由 AVHRR 和高分辨率图像计算的蒸散之间确实存在差异 ΔE (AVHRR 混合像元中其它地物对蒸散的影响),我们试图找到一种方法来订正此差异。实际上,该差异与模型中模拟的两个变量 T_s 和 a 有关。从表 2 中可以看到,两种图像的反照率差 Δa 之间相差非常小,范围在 0.8%—1.1% 之间,正如前所述,这可能是由于采用了由地面实测资料建立的模型的结果。经计算,反照率相差 1% 对于

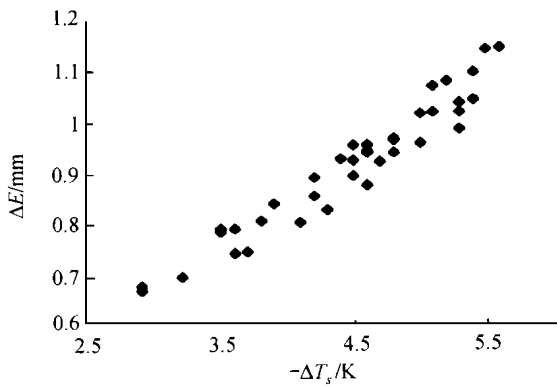
图 1 ΔT_s 和 ΔE 的分布图Fig. 1 Scatter plot of ΔT_s and ΔE

表 2 实际蒸散差与模拟的蒸散差等结果

Table 2 Actual and simulated difference of ET

$\Delta T_s/K$	$\Delta a/\%$	$\Delta E/mm$	$\Delta E'/mm$	F'
-3.7	1.1	0.69	0.77	10.7
-4.5	0.9	1.0	0.90	10.8
-4.4	1.0	0.98	0.88	10.7
-4.8	0.9	0.86	0.95	9.8
-4.2	0.8	0.86	0.85	1.1
-5.3	1.1	1.06	1.03	2.4
-4.6	0.9	0.86	0.92	6.9
-4.8	0.9	0.96	0.95	1.1
-5.6	1.1	1.17	1.08	7.8
-2.9	1.0	0.75	0.64	17.8

注:各差值是由高分辨率图像的结果与 AVHRR 图像结果相减所得, $\Delta E'$ 由回归方程 $\Delta E' = -0.166 * \Delta T_s + 0.155$ 得, F' 为 ΔE 与 $\Delta E'$ 之间的相对误差, 即由 $|\Delta E' - \Delta E| / \Delta E'$ 得。

蒸散差异的贡献不到 10%, 因此在此处, 我们对于反照率的影响暂不考虑。而地表温度 ΔT_s 的差达到 5K, 将 ΔT_s 和 ΔE 作散点图, 如图 1, 可以看到, 两者之间呈现一定的线形关系, 因此, 我们假设:

$$\Delta E' = A * \Delta T_s + B$$

将实际值带入回归方程, 算得 $A = -0.166$, $B = 0.155$ 。我们将实际的 ΔT_s 带入该回归方程, 模拟出 $\Delta E'$ (如表 2), 通过与实际的 ΔE 比较, 发现相对误差最大 17.8%, 平均误差 6.6%, 其相关系数达到 0.886, 因此, 用这种方法来订正蒸散之间的差异是可行的。

5 结 论

通过计算 AVHRR 图像像元和对应高分辨率图像作物区的蒸散, 发现两者之间存在明显差异, 该差异反映了 AVHRR 混合像元中其它地物对蒸散的贡献。利用线性回归方程模拟该差异, 与实际值相关

较好, 说明了用该方法来订正 AVHRR 图像计算出的蒸散的可行性。

本文仅将研究区域分为作物区和非作物区, 我们还可以继续研究出每种非作物占不同的百分比时对蒸散的影响, 今后在此方面还将继续开展工作。

反照率和地表温度反演模型的可靠性影响到蒸散计算的精度, 目前还没有成熟的模型, 在此方面也需进行深入的工作。

参 考 文 献 (References)

- [1] Brown K W, Rosenberg H T. A Resistance Model to Predict Evapotranspiration and Its Application to a Sugar Beetfield [J]. *Agron. J.*, 1985, **65**: 341-347.
- [2] Idso S B, Jackson R D, Reginato R J. Estimating Evaporation: A Technique Adaptable to Remote Sensing [J]. *Science*, 1975, **189**: 991-992.
- [3] Jackson R D, Reginato R J, Idso S B. Wheat Canopy Temperature: A Practical Tool for Evaluating Water Requirements [J]. *Water Resour. Res.*, 1977, **13**: 651-656.
- [4] Sequi B B Itier. Using Midday Surface Temperature to Estimate Daily Evaporation from Satellite Thermal IR Data [J]. *Int. J. Re. Sens.*, 1983, **4**(2): 371-381.
- [5] Tian Guoliang *et al.* Evapotranspiration and Soil Moisture Estimation of Wheat Field Based on NOAA-AVHRR Data and Ground Meteorologic Station Data [A]. Tian Guoliang. Remote Sensing Dynamic Research of Typical Regions of Yellow River Valley. Beijing: Science Press 1989. [田国良等. 用 AVHRR-AVHRR 数字图像和地面气象站资料估算麦田的蒸散和土壤水分 [A]. 田国良. 黄河流域典型地区遥感动态研究 [C]. 北京: 科学出版社, 1989.]
- [6] Li Fuqin *et al.* Estimation of Daily Evapotranspiration from One Time-of-day Thermal Infrared Temperature [A]. Tian Guoliang. Remote Sensing Dynamic Research of Typical Regions of Yellow River Valley [C]. Beijing: Science Press, 1989. [李付琴等. 用每日一次的热红外温度估算日蒸发 [A]. 田国良. 黄河流域典型地区遥感动态研究 [C]. 北京: 科学出版社, 1989.]
- [7] Sui Hongzhi *et al.* Two-layer Model of Evapotranspiration and Its Application in Remote Sensing Drought Monitoring [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, **1**(3): 220-224. [隋洪智等. 农田蒸散双层模型及其在干旱遥感监测中的作用 [J]. 遥感学报, 1997, **1**(3): 220-224.]
- [8] Jackson R D. Soil Moisture Inferences from Thermal-Infrared Measurements of Vegetation Temperatures [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1982, **20**(3): 282-286.
- [9] Becker F, Li Z L. Toward a local split window method over land surface [J]. *Int. J. Re. Sens.*, 1990, **11**(3): 369-393.
- [10] Hatfield J L, Perrier A, Jackson R D. Estimation of Evaporation at One Time-of-day Using Remotely Sensed Surface Temperature [J]. *Agric. Water Mgt.*, 1983, **7**: 341-350.
- [11] Chen Jingming. A Significant Flaw and Its Improvement of Remotely Sensed Evapotranspiration Model in Existence [J]. *Chinese Science*

- Bulletin*. 1988, **6**: 454—457. [陈镜明. 现有遥感蒸散模式中的一个重要缺点及改进[J]. 科学通报, 1988, **6**: 454—457.]
- [12] Sui Hongzhi *et al.* Synthetical Analysis of Drought Models [A]. *Annals of Laboratory of Remote Sensing Information Science, Chinese Academy of Sciences* [C]. 1995. [隋洪智等. 旱灾模型综合分析[A]. 中国科学院遥感信息科学开放研究实验室年报[C]. 1995.]

Effect Analysis of Non-single Surface on Evapotranspiration Obtained from AVHRR Image

YAN Chun-yan^{1, 2}, NIU Zheng², WANG Chang-yao², WANG Wen², LI Xiang-ge¹

(1. *Nanjing Institute of Meteorology, Dept. of Environmental Sciences, Nanjing 210044, China*; 2. *LARSIS, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China*)

Abstract: Mixed pixels constitute AVHRR image. Evapotranspiration (ET) calculated based on AVHRR image certainly includes some erroneous information of ground objects which have no meaning as far as ET is concerned. Registration of AVHRR image and high spatial resolution image is carried out. A meteorology-RS combination model is used to calculate the ET of the AVHRR image and that of the cropping area of the corresponding high resolution image respectively. The difference of these two ETs is given. The error is analysed and a corresponding statistical calibration method adaptable to the test region is given.

Key words: evapotranspiration; high resolution; AVHRR