

用卫星遥感热红外数据 估算大面积蒸散量*

陈 鸣 潘之棣

(水利部南京水文水资源研究所 南京 210098)

提要 从能量平衡方程出发,将试验场实测地表热红外温度及各项气象要素,用冠、气温度差方法,求得局部地区的蒸散量;进而与卫星热红外温度数据相配合,估算大面积作物的蒸散发和蒸散量分布。经验证,该方法的研究结果与实测值有较好的相似性。

关键词 遥感数据 热红外 蒸散发

分类号 P334.1; P333.1

1 前 言

蒸散发既是地表热量平衡的组成部分,又是水量平衡的组成部分,与作物生理活动和产量有密切关系。因此,蒸散发研究是地理学、气象学、水文学、土壤学和农学等多种学科共同关心的课题。长期以来,人们从不同角度对蒸散发进行了广泛研究,大多以点观测为基础。由于观测手段的局限性和地域的非均匀性,研究成果难以在大面积上应用。

卫星遥感热红外数据为研究这一问题带来了希望。多时相的热红外数据能反映下垫面温度分布,用卫星遥感方法估算大面积蒸散发较常规方法具有明显的优越性。

2 温度与蒸散发的关系

作物水分蒸散发导致叶面温度低于周围空气温度。水分供应不足时,蒸散发速率下降,叶面温度随之升高,以至高于周围空气温度。应用冠、气温差关系估算蒸散量就是建立在此基础上的。根据能量平衡方程有

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

式中 R_n 为净辐射; G 为导热通量; H 为显热通量; LE 为潜热通量。其中

$$H = \rho C_p (T_s - T_a) / r_o \quad (2)$$

本文于1993年5月18日收到,1993年10月19日收到修改稿。

* 参加工作的还有王国兴、李士鸿、王干臣、戚世森、荆国强、陈振洲等。

式中 ρ 为空气密度 (标准大气压情况下为 1349 kg/m^3), C_p 为定压下的比热, T_s 为作物叶面温度; T_a 为空气温度; r_a 为空气动力阻抗。将(2)式代入(1)式有

$$LE = R_n - G - \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_a} \quad (3)$$

空气动力阻抗 r_a 的求得还需要风速、平均零平面位移高度及粗糙度。(3)式中的参数确定须通过地面小范围试验求得。

3 地面试验

本次试验场选择在河南省新郑县犁河水利站, 位于东经 $113^\circ 44'$, 北纬 $34^\circ 24'$, 郑州市以南约 40 km 处。年平均降雨量 784.8 mm。周围大田为壤土、粉质壤土。冬春季作物为小麦, 在黄、淮、海平原有一定代表性。试验项目有: 热红外温度、小麦蒸散量、温、湿、风等。试验期为 1992 年 4 月初至 5 月底。各种观测项目与卫星过境时间同步。

3.1 叶面热红外温度测量

测量作物表面温度用中科院上海技术物理所研制的 HDG 高灵敏红外温度仪, 光谱响应 $7 \sim 14 \mu$, 分辨率 (NEDT) $< 0.01^\circ\text{C}$, 精确度 $1^\circ\text{C} \pm \%$, 视场角 4.7° 。为避免太阳入射方向影响, 取东、西、南、北、中五个方向的平均值为作物的表面温度。

3.2 温、湿、风的测定

在 1m 和 2m 两个高度布设温、湿测量, 计算温度梯度和湿度梯度。测量温、湿度使用套管干湿球温度表。测量风速使用旋杯式风向风速仪。

3.3 蒸散量和土壤水分观测

为对以后估算的蒸散发进行校核, 本次试验布置了原苏联国立水文研究所的 ГГН-50-500 土壤蒸发器。在蒸散桶中栽种小麦, 在没有水量输入输出情况下, 用称重法测两天的重量差, 即为日蒸散发损失水量。土壤水份测定为常规取土钻法, 取土深度为 0cm、5cm、10cm、20cm、30cm、40cm。

4 参数确定

4.1 空气动力阻抗 r_a [1]

在中性条件下, 即 $T_s = T_a$ 时有

$$r_a = \{ \ln[(Z-d)/Z_0] \}^2 / k^2 u \quad (4)$$

式中 Z 为参考高度; d 为平移层高度; Z_0 为表面粗糙度; k 为卡门常数 ($k = 0.4$); u 为风速。

非中性条件又分为稳定 ($T_s - T_a < 0$) 和不稳定 ($T_s - T_a > 0$) 两种情况。对于稳定情况有

$$r_{a0} = r_a [1 - n(Z-d)g(T_s - T_a)/T_a u^2] \quad (5)$$

式中 $T_0 = (T_s + T_a)/2$; g 为重力加速度; n 为系数 (常取 $n = 5$); $d = 0.63h$; h 为作物高度。

对于不稳定情况, 可直接用下式求显热通量 H 。

$$H = \alpha (T_s - T_a)^{3/2} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{1.3 C_p (g/T_a)^{\frac{1}{2}}}{5.2 (Z_2^{\frac{1}{2}} - Z_1^{\frac{1}{2}})} \quad (7)$$

式中 Z_1 、 Z_2 为地表以上两个不同的测量高度。这样根据不同条件选用(2)、(4)、(5)或(6)、(7)式即可算出显热通量 H 。

4.2 净辐射 R_n

净辐射 R_n 可用下式求得

$$R_n = Q(1 - A) - R_L \quad (8)$$

式中 Q 为总辐射, A 为反射率, R_L 为有效辐射。 Q 值可用气象台站实测值; 当小麦完全覆盖土壤后, 取 $A = 0.21 \sim 0.22$ 。有效辐射为^[2]

$$R_L = \delta \sigma T_a^4 (0.39 - 0.058 \sqrt{e}) \quad (9)$$

式中 σ 为 Stefan-Boltzmann 常数 ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$); δ 为地表辐射度 (小麦 $\delta = 0.97$); e 为空气绝对湿度。

4.3 导热通量 G

土壤导热通量 G 用下式求得

$$G = -\lambda \frac{\partial T_s}{\partial Z_d} = -\rho_m C K_T \frac{\partial T_s}{\partial Z_d} \quad (10)$$

式中 λ 为土壤导热率, C 为土壤比热, ρ_m 为土壤密度, K_T 为土壤导温系数; Z_d 为从地面指向下方的深度。土壤导热通量可通过分层测量土壤温度来计算, 但实测工作量大, 在有作物覆盖时, G 常可忽略^[3]。

4.4 求参数 a 、 b

由上述可知: 将(2)、(3)、(4) (或(5)、(6)、(7))、(8)、(9)式代入(1)式, 整理可得

$$LE = R_n + a - b(T_s - T_a)/r_{ao} \quad (11)$$

式中 a 、 b 为系数。

根据作物表面热红外温度、气温、蒸散量、湿度及气象台测量的辐射资料, 分别计算出 R_n 、 $(T_s - T_a)$ 、 LE 及 r_{ao} , 点绘相关图 (图1), 并用最小二乘法拟合计算得

$$LE - R_n = -111.27 + 0.709(T_s - T_a)/r_{ao} \quad (12)$$

其相关系数为 -0.85 。

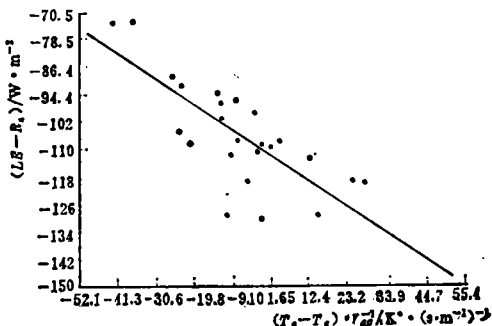


图1 $(LE - R_n)$ 和 $(T_s - T_a)/r_{ao}$ 相关图
Fig. 1. Relationship between $(LE - R_n)$ and $(T_s - T_a)/r_{ao}$

5 卫星热红外数据处理

5.1 卫星数据选用

本次试验采用了美国第三代业务气象卫星 (NOAA)、高级甚高分辨率辐射计 (AVHRR) 的可见光、近红外和热红外资料。扫描宽度 2800 km, 地面分辨率 1.1 km。

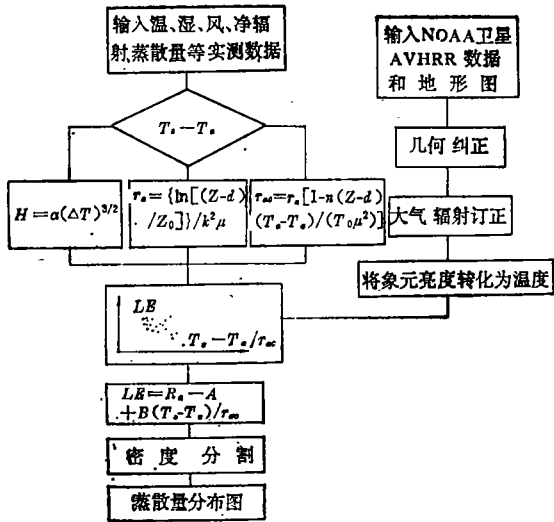


图 2 卫星遥感热红外数据图像处理框图

Fig. 2. Block diagram of processing satellite data

卫星数据处理区域为河南省东南部，东经 113°30′~115°30′，北纬 32°18′~35°20′，面积约 44077.5 km²，包括 39 个县。卫星成像时间在 1991 年~1992 年小麦生长季(见表 1)。

5.2 卫星遥感热红外数据处理

卫星遥感热红外数据处理又分为数据的预处理和蒸散量计算。处理过程见图 2。预处理包括几何纠正、辐射修正和温度订正。几何纠正是消除传感器在运行过程中飞行轨道、姿态及地球自转、地形起伏、地球曲率等引起的畸变，纠正采用地面控制点定位法，在地形图上和卫星影像上选取同名点坐标(见表 2)，产生纠正多项式(见表 3)，按该式计算全图各象元的新位置。

表 1 卫星成像时间

Table 1. Schedule of satellite scanning imagery

卫星成像时间(年、月、日)	所处小麦生长期
1991-11-15	越冬期
1992- 2 -23	返青期
1992- 2 -24	返青期
1992- 4 -11	抽穗期
1992- 4 -13	抽穗期
1992- 4 -19	抽穗期

辐射修正时，将卫星传感器接收到的辐射值代入普朗克公式即式(13)得到放射表面的等效亮度温度 $T_B^{[4]}$ 。

$$T_B = \frac{C_2 V_0}{\ln\left(\frac{C_1 V_0^3}{E(0)} + 1\right)} \quad (13)$$

式中 $E(0)$ 为卫星传感器接收到的辐射值， V_0 为中心波数， C_1 、 C_2 为常数($C_1 = 1.1910659 \times 10^{-5} \text{ mW/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-4}$ ， $C_2 = 1.438833^\circ \text{K/cm}$)。

由大气散射、吸收对各点的差异所产生的临边变暗现象，采用美国国家环境和资料信息服务局(NESDIS)的全球拼图业务系统使用的经验公式修正。

$$T = T_B + [\exp(0.00012\theta^2 - 1)](0.1072T_B - 26.81) \quad (14)$$

式中 T 是修正后的温度， θ 为卫星天顶角。

温度订正采用了 price 模式^[5]

$$T_s = \alpha T + \beta \quad (15)$$

表 2 卫星图像对地形图纠正坐标

Table 2. Calibration coordinate of satellite pixels and terrain map

纠正点数	象元列数	象元行数	地形图 x 坐标	地形图 y 坐标
6	333	307	227.00	360.00
	379	109	270.50	150.00
	227	233	134.00	279.00
	231	170	134.00	210.00
	304	394	203.00	453.00
	471	161	353.00	199.50

表 3 纠正多项式系数

Table 3. Coefficients of calibration polynomial equation

系数	x 坐标值	y 坐标值
b_0	118.1190	7.4587
b_1	0.9388	-0.2629
b_2	-0.1572	0.8601
b_3	0.0001	0.0004
b_4	0.0006	0.0003
b_5	0.0000	0.0000

式中系数 α 、 β 的确定，应用卫星过境时同步测量的小麦辐射温度与卫星资料修正后的 T 建立相关得出。本次试验所得系数 $\alpha = 1.2815$ ， $\beta = -0.0134$ 。

将预处理后的数据按(12)式计算，得地面各点的蒸散量，从蒸散量的直方图分析，用密度分割法归并成 5~7 个等级的蒸散发分布图，如图 3~5。

6 结果分析及验证

6.1 结果分析

本次试验共处理了 6 个时像的卫星数据，可划分为 3 个时期，1991 年 11 月 15 日为小麦越冬期，作物覆盖度小，计算结果主要反映为土壤蒸发量。1992 年 2 月 23 日、24 日为小麦返青期，卫星传感器接收到的辐射能为土壤、小麦混合辐射，蒸散量亦为两者的混合蒸散量。1992 年 4 月 11 日、13 日和 19 日为小麦抽穗期，小麦完全覆盖了土壤，计算结果主要反映小麦蒸散量。综合各时像处理结果可以看出：

(1) 小麦越冬期的蒸散量小于抽穗期的蒸散量。其主要原因有两点：① 该时期土壤水分含量较低，即蒸散发面上可资蒸散发用的水分较少；② 该时期的太阳辐射能较低，1991 年 11 月 15 日郑州台实测日总辐射为 $15.05\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ，即蒸散发所需的能量较少，而抽穗期则反之，见图 3。

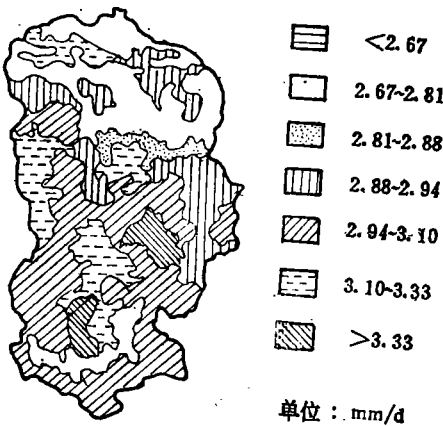


图 3 1991 年 11 月 15 日蒸散量分布图
Fig. 3. Evapotranspiration values distribution (11-15-1991)

(2) 小麦越冬期蒸散量区域差异较小，一般为 2.66~3.33mm/d，北纬 34° 以北地区，由于持续干旱，降水补给量少，蒸散量在 2.66~2.81mm/d 之间，南部如淮滨、息县、正阳、新蔡等县由于土壤较湿润蒸散量较大，一般在 3.10~3.33 mm/d 之间，见图 3。

(3) 抽穗期蒸散量区域差异较大，如 4 月 19 日结果为 3.98~5.10mm/d。其分布特性不具有明显的南、北差异，而主要由前期降雨决定。如 4 月 8 日、9 日郑州、新郑、尉氏、长葛等地区有降雨，反映在 4 月 11 日图上：上述地区蒸散量较高，在 3.40mm/d 以上。南部地区如息县、正阳、确山等县前期降雨量少，则蒸散量较小，均小于 2.60mm/d，见图 4。

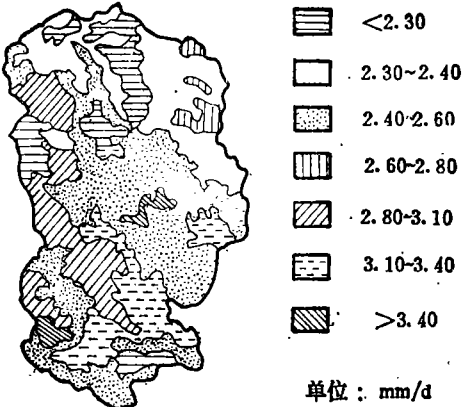
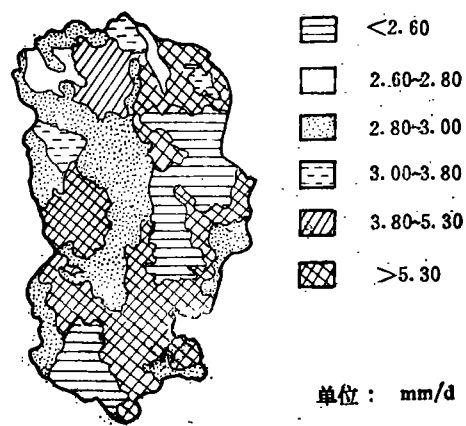


图 4 1992 年 2 月 23 日蒸散量分布图
Fig. 4. Evapotranspiration values distribution (2-23-1992)

图 5 1992 年 4 月 11 日蒸散量分布图
Fig. 5. Evapotranspiration values distribution (4-11-1992)

(4) 返青期的蒸散量介于小麦越冬期和抽穗期之间；在没有前期降雨影响的情况下呈北小南大趋势；有前期降雨影响的情况下主要受降雨分布影响，见图 5。

6.2 验证

由于没有足够的陆面蒸散实测资料可供使用，本次验证只能采用各气象台实测水面蒸发量作为粗略验证依据。根据 R. J. 汉克斯^[6]提出的作物系数 K_c 和土壤水系数 K_s 概念，将河南省气象台提供的实测水面蒸发量值换算成作物实际蒸散量 E_c ，与遥感估算的蒸散量进行比较验证。结果见表 4。最大误差 20.7%，最小误差 7.3%，平均误差 13.3%。

表 4 根据实测资料计算的蒸散量与遥感估算蒸散量比较表(1992.2.23)

Table 4. Comparison between calculatied evapotranspiratio nvalues by field measurement and estimated evapotranspiration values by remote sensing

站名	水面蒸发量(mm)	计算蒸散量(mm)	遥感估算蒸散量(mm)	相对误差(%)
封丘	6.87	2.6	2.2	18.2
原阳	6.87	2.6	2.4	8.3
许昌	7.94	3.0	2.6	15.4
太康	9.25	3.5	2.9	20.7
正阳	10.05	3.8	3.1	14.3
确山	7.67	2.9	3.2	9.2
新郑	8.00	3.5	3.3	7.3

7 讨 论

应用卫星热红外数据估算大面积蒸散量,是近年来国内外各学科研究的热点之一。通过本次试验研究,发现有以下问题:

(1) 一个试验场的实验数据,受下垫面土壤、作物品种、作物生长状况及温、湿、风等气象诸因素的影响,由此确定的模式参数应用于大面积有一定的局限性。随着实测点的增加,精度将能大幅度提高。

(2) 由于土壤的蒸发过程与作物的蒸散发过程不一样,因此对小麦不同生长期笼统使用一个模式也必定会引起误差。

(3) 卫星热红外数据的辐射修正和温度订正所用实测资料较少,误差仍然较大。

(4) 在计算潜热通量 LE 时,空气动力阻抗 r_a 是一个影响较大的参数,尽管对 r_a 进行了较详细分析,以不同条件下分别求得,但仍存在许多不确定因素。

综上所述,利用卫星热红外数据估算大面积作物蒸散量,是一种有待改进和完善的方法。随着遥感技术和地面试验研究的发展,该方法将能达到实用地步。

参 考 文 献

- 1 Toby N Carlson, Elecn M. Perry and Thomas J Schmagge. Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields. 1990, 52: 45~69
- 2 高国栋, 陆渝蓉. 中国地表面辐射平衡与热量平衡. 北京: 科学出版社, 1982. 63~77
- 3 B Seguin, E Assad, J P Fpetaud. Use of moteorological satellite for water balance monitoring in Sahelian regions. INT J Remote Sensing. 1989, 10 (6): 1101~1117
- 4 田国良. 土壤水分的遥感监测方法. 环境遥感. 1991, 2
- 5 John C. Price, Estimating surface temperatures from satellite thermal infrared data — A simple formulation for the atmospheric effect. 1983. Remote Sensing of Environment. 13, 353~363
- 6 R J 汉克斯, G L 阿希克洛夫特编著, 杨诗秀等译. 应用土壤物理-土壤水和温度的应用. 北京: 水利电力出版社, 1984. 123~153

Estimation of Large Area Evapotranspiration by Thermal Infrared Satellite Data

Chen Ming and Pan Zhidi

(Nanjing Institute of Hydrology and Water Resources, Nanjing 210098)

Abstract: This is a new way estimating large area evapotranspiration by thermal infrared satellite remote sensing data. On the basis of energy balance equation, local evapotranspiration was calculated by the difference of plant canopy and air temperature that was presented by field measuring ground surface thermal infrared temperature and a variety of meteorological factors. Furthermore, large area evapotranspiration and distribution were estimated by thermal infrared satellite data. Study results of the way are more similar to value of field measurement, which was verified. The way will be improved in order that it will be real applied.

Key words: remote sensing data; thermal infrared; evapotranspiration.