

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.04.018

基于 IDL 的 MODIS 影像地表蒸散发参数反演系统

邓世赞¹, 张友静^{1,2}, 张子衡¹, 谢丽军¹, 王文种¹

(1.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098 2.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:针对水文水资源分析计算所需要的地表蒸散发参数难以获取的问题,利用 MODIS 遥感影像数据和气象观测数据,采用 SEBAL(地表能量平衡)模型,并结合 ENVI/IDL 二次开发语言构建了流域陆面蒸散发反演系统.以黄河三花间(三门峡—花园口区间)流域为例,编程实现了地表温度、植被指数、水体指数、不透水面指数等蒸散发计算所需相关地表参数的提取和日陆面蒸散发量的计算,并利用 IDL 的统计分析功能,通过随机采样,综合分析了地表参数与蒸散发量的关系.应用结果表明,该系统具有平台无关性特点,人机交互友好,可作为独立模块加入水文分析等专业系统,有效解决了通用遥感软件缺乏专业信息提取功能的问题.

关键词:地表蒸散发参数;反演系统;SEBAL 模型;MODIS 影像;ENVI/IDL;黄河三花间流域

中图分类号:P426.2;P237

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2010)04-0447-05

地表蒸散发参数是涉及多个圈层水热交换与平衡的重要参数.利用气象数据,采用彭曼—蒙特斯模型、彭曼—组合模型和基于太阳辐射的日蒸散发模型等,计算点尺度的蒸散发,已有许多研究^[1-2],但由于这些研究局限于离散的点观测与估算,存在插值外延精度低、大范围高密度观测成本大等缺陷.随着多时相、多分辨率卫星遥感数据的应用,通过遥感信息提取来估算地表蒸散发方法的应用越来越广.

在地表蒸散发遥感反演方法中,SEBAL(地表能量平衡)模型^[3-4]是目前应用较多的模型之一.但蒸散发计算中所需要的地表参数众多,流程复杂,需要遥感专业人员进行重复性的演算,不利于长时间序列的蒸散发反演.Wang J 等^[5]改进了 SEBAL 模型,并利用 C++ 语言对农作物——山核桃的消费性用水量进行了计算,但模型参数局限于产品数据,无法从原始影像中反演得到.吴炳方等^[6]利用能量平衡余项式方法和 Penman-Monteith 模型相结合的方法开发了区域蒸散发遥感监测系统,该系统利用逐日气象数据与遥感反演参数,能动态反映区域蒸散发的时空变化规律,但其简化了地表与大气由于温度差引起的热量传输过程,使反演的蒸散发量具有一定的不确定性.

针对以上问题,本文利用 MODIS 遥感数据并结合地面气象观测数据,应用 SEBAL 模型,通过 ENVI/IDL 二次开发语言实现了日蒸散发量的批处理,并给出了该方法的应用实例.

1 SEBAL(地表能量平衡)模型

SEBAL 模型的优点是充分利用由遥感图像反演得到的地表参数,结合少量的常规气象资料就能得到区域地表蒸散发量.该模型建立的基础是能量平衡方程^[7],即

$$R_n = G + H + \lambda E \quad (1)$$

式中: R_n ——地表净辐射通量; G ——土壤热通量,即下垫面土壤中的热交换量; H ——下垫面到大气的显热通量(也称感热通量); λ ——水的汽化潜热; E ——蒸散发量; λE ——下垫面到大气的潜热通量.计算得到各通量后,再利用能量平衡方程就可以反演日蒸散发量.

1.1 地表净辐射通量

地表净辐射通量是地表接收到的太阳辐射和大气长波辐射减去地表面反射的太阳辐射和发射的长波辐

射后得到的辐射差值.它是地表能量、动量、水分输送与交换过程中的主要能量来源.地表辐射平衡方程为^[8]

$$R_n = Q(1 - a) + \epsilon_a \sigma T_a^4 - \epsilon_s \sigma T_s^4 \tag{2}$$

式中: Q ——太阳总辐射; a ——反照率; ϵ_a ——地表反射率; ϵ_s ——地表比辐射率; σ ——斯蒂芬-波尔兹曼常数; T_a ——空气温度; T_s ——地表温度.

1.2 土壤热通量

土壤热通量是指用于土壤热交换的那部分能量,表征土壤表层和深层的热量传递.对于植被覆盖区域,土壤热通量与地表净辐射通量的比值为^[9]

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s - 273.15}{a} (0.0032a + 0.0064a^2)(1 - 0.978b^4) \tag{3}$$

式中 b 为归一化植被指数.

不同地物类型,土壤热交换不同:非植被-裸土, $G = 0.2R_n$;水体, $G = 0.9R_n - 40$.

1.3 显热通量

显热通量表征下垫面与大气间湍流形式的热交换,又称感热通量,其表达式为^[10]

$$H = \rho C_p (T_s - T_a) / r_a \tag{4}$$

式中: ρ ——空气密度; C_p ——空气定压质量热容; r_a ——空气动力学阻抗.

1.4 日蒸散发量

由于遥感所获得的是瞬时蒸散发量,需推算到日蒸散发量.本文采用谢贤群的正弦公式^[11],考虑到1d中不可避免地会有云的出现,而气象站观测到的日照时数可以反映1d中云的出现时长,因而在进行时间尺度扩展的过程中,加入日照时数来进行校正^[12].

$$E_d = \frac{2N_E E_t}{\pi \sin(\pi t / N_E)} \left(a + b \frac{n}{N_E} \right) \tag{5}$$

式中: a, b ——系数,一般分别取0.25和0.50; n ——气象站观测日照时数; N_E ——理论日照时数,可以通过地理纬度计算得出; t ——影像接收时间; E_t ——瞬时蒸散发量; E_d ——日蒸散发量.

2 日蒸散发量算法的IDL实现

2.1 气象数据插值

SEBAL模型蒸散发反演过程中部分地表参数的计算必须依靠气象站实测数据,而由于气象站数据往往是离散的,必须通过插值方法获取该区域任意点的数据.本系统通过IDL语言自动交互读取气象站矢量文件,利用griddata函数中反距离插值方法实现气象数据的插值.

2.2 地表参数反演

SEBAL模型涉及地表参数较多,其中大气透过率、地表反照率、地表比辐射率等大多数参数通过经验模型求出^[13].本文以地表温度为例,采用劈窗算法,简述其IDL的实现过程.算法的实现主要利用地表辐射率和大气透过率2个因子.在计算大气透过率时不仅要利用MODIS的B31和B32波段对其进行温度校正,还要结合MODIS原始影像中Sensor Zenith数据集对传感器进行视角校正.具体实现流程图见图1.

为提高系统运行效率,将众地表参数合成一个文件,每个地表参数相当于其中1个波段,需要该数据时可直接读取该波段数据.对本模块而言,用户可以通过界面选择不同的参数和计算方法,并可以方便地按不同渲染方式输出地表参数影像,如图2所示.

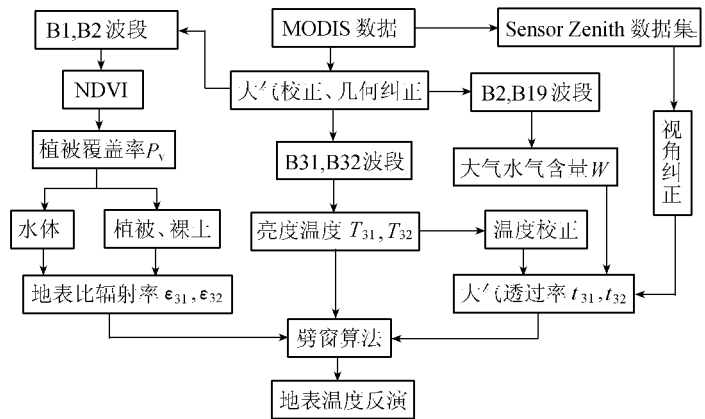


图1 地表温度反演算法流程
Fig. 1 Flow chart of inversion of surface temperature

2.3 SEBAL 模型各通量 IDL 的实现

2.3.1 净辐射通量

考虑到地形起伏导致的阳坡和阴坡太阳辐射不同,将对太阳辐射进行地形校正.本系统考虑了 DEM 及所反映的地形特征参数如坡度、坡向的太阳天顶角校正,校正时只需输入影像获取时间、DEM、经纬度波段等初始条件.

2.3.2 土壤热通量

计算土壤热通量时,将地表分为水体、植被和裸土 3 类,并利用 IDL 提供的 where 判别函数来判断地物类型.计算某类型地表土壤热通量时,首先计算归一化植被指数 $NDVI$ (以 I_{NDV} 表示),然后分别查找 $I_{NDV} > 0.25$ 、 $I_{NDV} < 0$ 和 $I_{NDV} = 0 \sim 0.25$ 之间所包含的像元并获取各个像元所在的位置,最后再计算这些像元的土壤热通量.裸土地表土壤热通量 IDL 实现算法为

$$\text{index} = \text{where}((b \text{ lt } 0.25) \text{ and } (b \text{ ge } 0)) \text{ , } n \\ \text{if } (n \text{ gt } 0) \text{ then } Q_f[\text{index}] = 0.2 * Rn[\text{index}]$$

2.3.3 显热通量

显热通量的计算最为复杂,SEBAL 模型引入了“干点”和“湿点”概念,利用“干点”处蒸散发量基本为 0,而“湿点”处蒸散发量达到最大的假设,结合近地表面温度差的线性函数,并考虑大气稳定度,通过 Monin-Obukhov 方法^[14]求得不同状态条件下的摩擦风速、动力学粗糙度和阻抗等参数^[15],从而计算获得显热通量 H .本文通过 IDL 语言并以显热通量的变化小于 1% 作为循环终止条件,实现了整个循环迭代过程.

在程序实现过程中,“干点”和“湿点”根据地表温度参数来选取(图 3).为保证“干点”和“湿点”选取的合理性,应考虑研究区局部云层覆盖导致的地表温度降低而引起的误差.利用云层的高反射低温度特点,通过多波段合成方法将云层检测出来,获取其所在像元位置,并进行掩膜处理.

3 SEBAL 模型日蒸散发量反演

黄河三花间(三门峡—花园口区间)是我国中部地区主要的半干旱区,该系统的研究区包括陕西、山西、河南 3 省的部分地区.该区域地表类型复杂,春季易干旱,夏季多暴雨.本研究采用的遥感影像是 Terra 卫星的 2002 年 3 月 8 日、4 月 18 日和 6 月 12 日 3 期 MODIS 影像.

3.1 日蒸散发量 IDL 批处理结果

充分利用 ENVI/IDL 二次开发函数,实现了日蒸散发量反演的批处理.运算过程中,仅需要人工选择预处理后的 MODIS 影像、对应日期气象 shapefile 文件以及 DEM 数据和初始条件,经系统运算就可得到日蒸散发量分布,如图 4 所示.

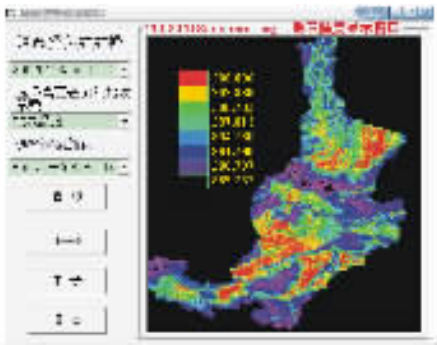


图 2 地表参数查询窗口
Fig. 2 Interface for querying surface parameters

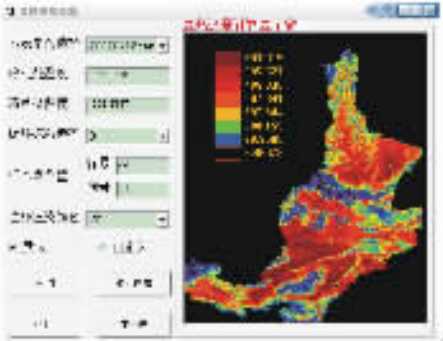


图 3 显热通量计算显示窗口
Fig. 3 Interface for calculating sensible heat flux

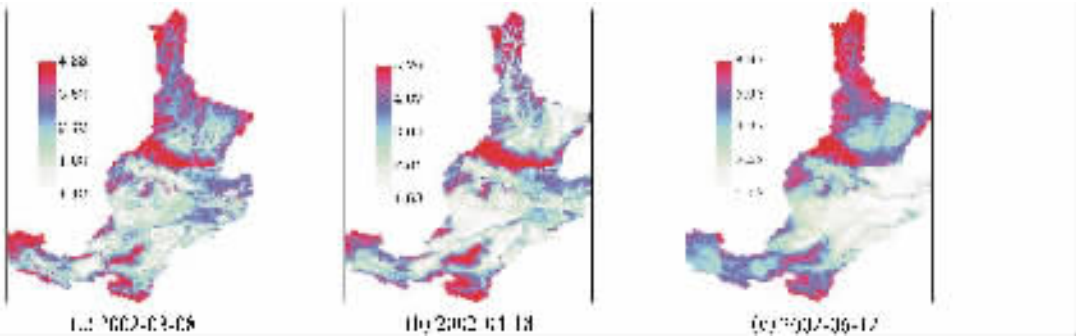


图 4 黄河三花间日蒸散发量分布(单位: mm)

Fig. 4 Distribution of daily evapotranspiration in Sanmenxia-Huayuankou watershed of Yellow River(unit : mm)

分析图4可知,日蒸散发量高值区分布在研究区西南熊耳山地带以及北部植被覆盖度较高的山区及有灌溉的农业区,一般在4 mm以上,而植被覆盖相对较少的裸土和城镇,蒸发量相对较小,一般在1.0~2.5 mm之间.不同下垫面具有不同的地表特征和水热性状,有植被覆盖区明显大于周围无植被区和少植被区.日蒸散发量的空间分布基本符合实际.

3.2 日蒸散发量与地表参数相关分析

IDL语言在数据处理、统计分析与图形显示方面具有强大的优势,可以使开发者通过较少的命令完成大量的数据预处理、变换及统计分析等工作.通过对日蒸散发量与地表参数的统计计算和相关分析(图5),可以知道各参数对蒸散发量的影响程度.

分析结果表明:日蒸散发量与地表温度相关性最好,整体呈线性负相关关系.相关系数 R 达到0.95,这是由于地表温度高的区域多为植被覆盖相对比较少的地区,植被覆盖度高的地区由于植被蒸腾作用造成冠层温度降低;日蒸散发量与地表温度差和植被指数的相关系数分别为0.63和0.61.

4 参数计算结果存取

为了将日蒸散发量反演过程中计算获得的地表参数和其他参数进行影像匹配,可以将其结果保存为ENVI标准格式或指定格式,并定义好地理坐标投影.应用时,通过自定义map_info函数读取校正后的影像坐标并赋予参数影像就可以实现了.具体代码如下:

```
openw unit file /get_lun //创建并打开新文件
writeu unit a //将数据写入文件
free_lun unit
mapinfo = map_inf( filename ) //调用函数获取原文件坐标信息
Envi_setup_heard fname = file ns = ns nl = nl nb = nb data_type = 4 interleave = 0 , $
map_info = mapinfo offset = 0 /write //将坐标信息写入头文件
```

5 结 语

本文基于SEBAL模型,在IDL环境下编程建立了地表蒸散发反演系统.该系统界面友好,操作简单,运算速度快,可进行批量、快速的日蒸散发量计算,统计分析功能可用于精度评价、蒸散发与地表参数回归分析等.由于该系统具有平台无关性特点,因而可将其作为独立模块加入水文分析等专业系统,从而可有效解决通用遥感软件缺乏专业信息提取功能的问题.

参考文献:

[1] PETER W. A discussion on and alternative to the Penman-Monteith equation[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(4): 711-721.

[2] CHAUHAN S, SHRIVASTAVA R K. Performance evaluation of reference evapotranspiration estimation using climate based methods and artificial neural networks[J]. Water Resources Management, 2009, 23(5): 825-837.

[3] 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.

[4] BASTIAANSEN W G M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin[J]. Journal of Hydrology, 2000, 229(1/2): 87-100.

[5] WANG J, SAMMIS T W, MEIER C A, et al. A modified SEBAL model for spatially estimating pecan consumptive water use for Las Cruces, New Mexico[C].//American Meteorological Society 15th Conference on Applied Climatology. Savannah, GA [s. n.], 2005:

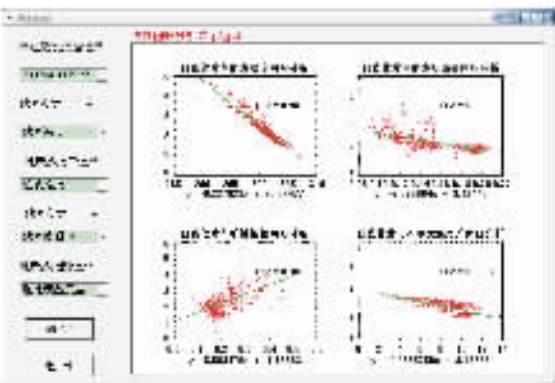


图5 日蒸散发量与各地表参数
相关分析显示窗口(2002-04-18)

Fig. 5 Interface for correlation between daily
evapotranspiration and surface parameters
(April 18, 2002)

paper number 7.13.

[6] 吴炳方 熊隽 闫娜娜 等. 基于遥感的区域蒸散量监测方法 :ETWatch[J]. 水科学进展 2008 ,19(5) :671-678.(WU Bing-fang , XIONG Jun ,YAN Na-na ,et al. ETWatch for monitoring regional evapotranspiration with remote sensing[J]. Advances in Water Science , 2008 ,19(5) :671-678. (in Chinese))

[7] 杨永民 冯兆东 周剑. 基于 SEBS 模型的黑河流域蒸散发[J]. 兰州大学学报 :自然科学版 2008 ,44(5) :1-3.(YANG Yong-min ,FENG Zhao-dong ,ZHOU Jian. Evapotranspiration in heihe river basin based on SEBS mode[J]. Journal of Lanzhou University : Natural Science 2008 ,44(5) :1-3.(in Chinese))

[8] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京 :科学出版社 2003 :432-436.

[9] 李守波 赵传燕. 基于能量平衡的关川河流域蒸散发的遥感反演[J]. 遥感技术与应用 2006 ,21(6) :521-525.(LI Shou-bo , ZHAO Chuan-yan. Estimating evapotranspiration based on energy balance in guanchuan river basin using remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application 2006 ,21(6) :521-525.(in Chinese))

[10] 韩惠. 基于遥感技术的祖厉河流域土地利用/土地覆盖变化与蒸散发研究[D]. 兰州 :兰州大学 2006.

[11] 谢贤群. 遥感瞬时作物表面温度估算农田全日蒸散总量[J]. 遥感学报 ,1991 ,4(4) :253-260.(XIE Xian-qun. Estimation of daily evapo-transpiration from one time-of-day remotely sensed canopy temperature[J]. Journal of Remote Sensing ,1991 ,4(4) :253-260.(in Chinese))

[12] 姜红. 基于 MODIS 影像的新疆奇台县区域蒸散发量的研究[D]. 乌鲁木齐 :新疆大学 2007.

[13] 鲍平勇. 半干旱区域日蒸散发估算的遥感研究[D]. 南京 :河海大学 2007.

[14] KOLOSKOV G ,MUKHAMEJANOV K H ,TANTON T W. Monin-Obukhov length as a cornerstone of the SEBAL calculations of evapotranspiration[J]. Journal of Hydrology 2007 ,335(1/2) :170-179.

[15] 唐荣林. 基于 SEBAL 模型的海河流域蒸散发的时空反演研究[D]. 武汉 :武汉大学 2007.

Inversion system of surface evapotranspiration parameters for MODIS data based on IDL

DENG Shi-zan¹ , ZHANG You-jing^{1 , 2} , ZHANG Zi-heng¹ , XIE Li-jun¹ , WANG Wen-zhong¹

(1. College of Hydrology and Water Resources , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : As for the difficult acquisition of surface evapotranspiration parameters for analysis and calculation of hydrology and water resources , an inversion system of surface evapotranspiration for watersheds was established by using the MODIS data and observed meteorological data and the SEBAL model based on ENVI/IDL. The Sanmenxia-Huayuankou watershed of Yellow River was taken as a case study. The relevant surface parameters for calculating evapotranspiration were extracted and realized , including surface temperature , vegetation index , water index , impervious surface index and so on. The daily evapotranspiration was then calculated. The relationship between the surface parameters and the evapotranspiration was comprehensively analyzed by the statistical analysis function of IDL through random samples. The results show that the system is independent of software and has friendly man-machine interaction. It can be embedded into professional hydrological analysis systems as the independent module , and it effectively solves the problem of extracting professional information that general remote sensing software can not be achieved.

Key words : surface evapotranspiration parameter ; inversion system ; SEBAL model ; MODIS data ; ENVI/IDL ; Sanmenxia-Huayuankou watershed of Yellow River