

# 基于组件技术的地表蒸散发遥感监测系统设计与应用

钱志奇<sup>1</sup>, 张友静<sup>1,2</sup>, 邓世赞<sup>1</sup>, 房莹莹<sup>1</sup>, 陈晨<sup>1</sup>

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 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, 南京 210098)

**摘要:**针对遥感模型与水热模型集成应用的需求,以C#语言结合ENVI/IDL和ArcGIS Engine混合编程技术,设计开发了地表蒸散发遥感监测系统的基本流程,对系统数据库设计及遥感模型与水热模型集成模式进行了研究,研发了单元蒸散发参数反演与结果校验功能,实现了遥感模型与水热模型的集成应用。系统对黄河三花间流域以MODIS遥感影像数据进行实验,很好地实现了地表蒸散发参数反演与校验功能,完成了蒸散发反演结果在时间与空间尺度上的扩展。实验结果表明,该系统人机交互友好、执行时间短、效率高,不仅独立完成了对部分地表蒸散发参数的提取任务,利用其蒸散发批处理功能,可有效地解决常用遥感软件在地表蒸散发反演过程中专题信息提取过程复杂繁琐的难点,具有较高的实用价值。

**关键词:** 遥感监测系统; 地表蒸散发; 集成; C#; ENVI/IDL

**DOI:** 10.3724/SP.J.1047.2011.00679

## 1 引言

蒸散发是地表水分与能量循环过程中的重要组成部分。快速准确地估算蒸散发,是合理利用和分配水资源的必要前提,传统的地表蒸散发计算方法局限于点尺度的观测与估算已不能满足大尺度研究的需要<sup>[1-2]</sup>。多时相、高光谱、高分辨率的遥感影像数据能够很好地反演下垫面几何结构与植被覆盖等重要参数,已逐渐成为很多学者用于监测地表状态的重要手段<sup>[3-5]</sup>。许多遥感地表蒸散发的研究成果可为遥感监测提供技术基础,但通常都只对特定流域、特定时段和特定数据源有效,缺乏通用性。因此建立一个系统化、业务化的遥感监测系统有实际应用价值。传统的GIS与RS开发工具由于其不灵活的开发方式及昂贵的价格,在相当大的程度上限制了其在该应用领域的发展。组件技术能将功能算法固化封装于组件之中,将部分功能抽象为功能组件,以组件形式供给开发者使用。国内外已有很多学者进行遥感监测系统的建立,取得了许多重要成果<sup>[6-11]</sup>。这些研究表明,采用组件技术建立地表蒸散发遥感监测系统能够加快开发速度与效率,提高系统整体运行水平。但如何将传统的水

文、气象方法和RS/GIS技术的优势结合起来,研究开发流域陆面蒸散发的计算及其校验系统,已成为许多基础研究与应用研究所关注的重要问题。特别是将遥感模型和水热模型集成于系统中,既实现蒸散发计算,又对模型结果进行验证的研究,目前尚未有系统报导。本文目的是通过系统化地建立地表蒸散发遥感监测系统,实现遥感模型与水热模型的高度集成,完成地表蒸散发参数反演与模型验证,为水资源管理与规划提供数据支持和信息服务。

## 2 遥感监测系统设计与集成技术

地表蒸散发遥感监测涉及到大量遥感数据的获取、预处理、地表参数反演、蒸散发计算与结果校验,以及报表生成等诸多环节,处理过程复杂繁琐。如果仅采用常规的遥感图像处理软件与方法,没有一个高水平业务化应用系统来支持大量卫星遥感信息的处理,不仅耗时耗力,资料利用率低,更无法达到快速获取成果与监测的要求。所以建立地表蒸散发遥感监测系统有很高的应用价值。

根据系统研究目标,系统需求包括3个方面的内容:第一,能够独立完成地面蒸散发参数反演与

**收稿日期:** 2010-11-22; **修回日期:** 2011-9-22.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(40830639); 国家"973"计划项目(2010CB951101)。

**作者简介:** 钱志奇(1985-),男,江苏常州人,硕士研究生。主要从事地理信息系统与遥感研究。

E-mail: qzq85827@163.com

结果验证;第二,实现多源遥感数据与专业水热模型的高度集成,解决数据获取、预处理、模型计算与数据存储等问题;第三,能够给研究人员或决策者提供所需的专题内容与报表。

2.1 系统的总体设计

2.1.1 系统功能设计与流程

根据需求,本系统采用树状流程结构,完成多项子功能。专业人士可根据需要定制自己的操作流程,输入和获取中间数据;非专业人士可依据提示输入必要参数,使用系统的建议流程完成地表蒸散发参数反演与验证并达到各种分析与决策的目的。系统划分为数据输入、数据处理与数据输出 3 个部分:数据输入包括遥感影像,常规气象水文数据与蒸散发反演关键参数的输入。该部分属于用

户交互关键部分,参数的选择直接决定了最终成果的精度。而遥感影像与常规气象数据是之后所有处理数据的源数据;数据处理应包括:数据预处理、下垫面因子提取、蒸散发反演与验证、蒸散发时间与空间尺度扩展。其中,数据预处理包括了几何校正、辐射定标、大气校正、云层掩膜与气象水文数据插值处理。下垫面因子提取成果为蒸散发反演服务,根据水文模型反演地表蒸散发参数,继而划分空间响应单元,进行地表蒸散发时间与空间尺度插值。同时,利用水文模型验证蒸散发反演结果;数据输出包括监测结果的实时显示、专题数据产品制作、结果统计分析与报表自动生成。实时的显示监测结果结合统计分析功能方便用户快速提取专题数据产品,再利用快速报表制作功能,大大提高了遥感监测系统的使用效果(图 1)。

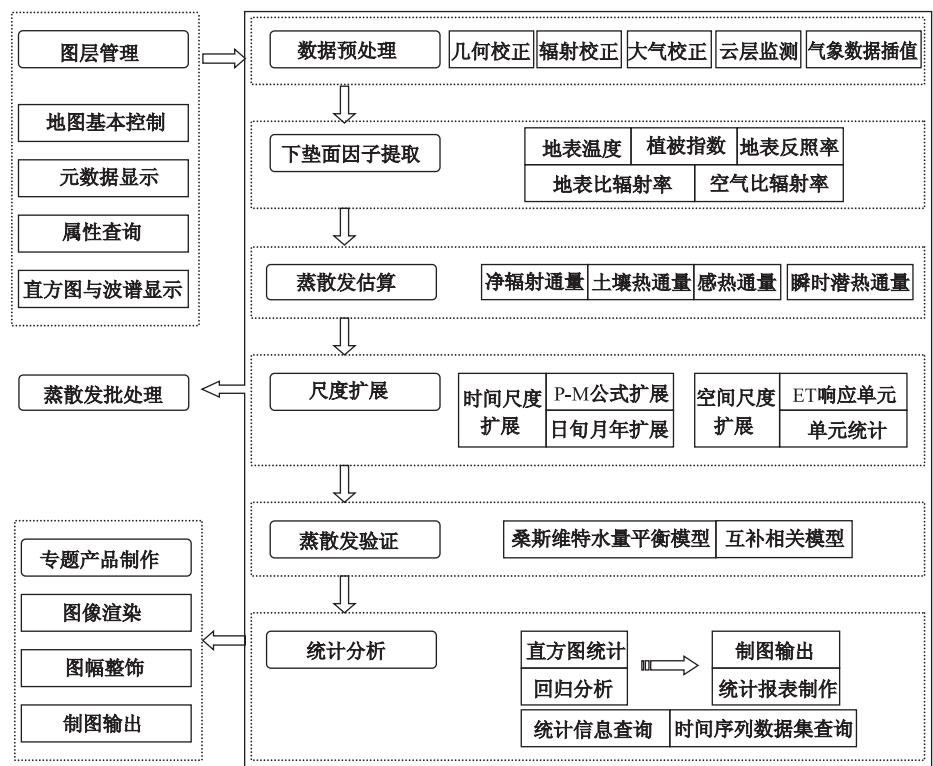


图 1 系统基本流程图

Fig. 1 Basic flow chart of the system

地表蒸散发遥感监测系统不仅需要实现地表蒸散发反演,同时还需实现对气象数据的 P-M 公式的日蒸散发数据在时间尺度(旬、月、季、年)上的扩展。并结合降水数据实现水量平衡原理的桑斯威特模型,以及互补相关模型,从时间尺度或空间尺度(气象站点尺度、响应单元面尺度、流域面尺度)

对模型进行验证分析,最终建立长时间序列的蒸散发数据集,动态反演时间变化规律。

2.1.2 系统数据库设计

基于组件技术的地表蒸散发遥感监测系统数据种类较多,涉及大量多源、多尺度、多时相遥感数据、基础地理数据、地表参数专题数据、地表通量反

演数据、气象水文数据、光谱数据及其他属性数据和统计数据等。

(1)空间数据图层

空间数据图层存贮系统主界面中基本图层操作及交互查询需要的空间数据。主要包括下述 3 种类型:基础地理数据层、遥感影像数据、数字高程模型。遥感影像数据包括分辨率为 1 000m 的 MODIS 原始遥感影像、预处理影像数据、地表参数反演数据、地表通量反演数据,以及部分气象插值影像数据等。

(2)遥感影像信息

遥感影像元数据信息:该资料信息主要包括当前系统中拥有的卫星影像资料元数据信息,包括每条数据的影像名称、存放路径、接收日期、分辨率大小、投影信息、经纬度范围、卫星平台、数据描述类型等,在数据库中建立遥感影像元数据信息表(表 1)。

表 1 遥感影像元数据信息表  
Tab. 1 RS image metadata sheet

序号	字段名	标识符	类型及长度
1	编号	ID	Long
2	影像名称	Name	string
3	存放路径	directory	string
4	卫星平台	Sensor	string
5	接收日期	time	Date
6	分辨率大小	pix_size	string
7	影像大小	Image_size	string
8	投影信息	info	string
9	经度范围	Lati_fanwei	string
10	纬度范围	Long_fanwei	string
11	数据描述	description	string

遥感影像参数统计信息:以影像接收时间、研究区域、传感器类型、影像名、统计参数类型、最低值、平均值、最高值、标准差为字段在数据库中建立遥感影像参数统计信息表(表 2)。

表 2 遥感影像参数统计信息表  
Tab. 2 RS image parameters sheet

序号	字段名	标识符	类型及长度
1	编码	ID	integer
2	影像接收时间	Time	Date
2	研究区域	Quyu	string
3	传感器类型	Sensor	string
4	影像名	Type	string
5	统计参数类型	Type	string
6	最低值	Min-value	single
7	平均值	Mean-value	single
8	最高值	Max-value	single
9	标准差	Stdev	single

遥感影像样本点统计信息:以时间、经度、纬度、行号、列号、地表温度、植被指数、地表净辐射、土壤热通量、显热通量、潜热通量、日蒸散发为字段在数据库中建立遥感影像样本点统计信息表(表 3)。

表 3 遥感影像样本点统计信息表  
Tab. 3 RS image sample points sheet

序号	字段名	标识符	类型及长度
1	时间	Time	Date
2	经度	Lontitude	double
2	纬度	Latitude	double
3	行号	ns	integer
4	列号	nl	integer
5	地表温度	wendu	float
6	植被指数	NDVI	float
7	地表净辐射	Net_heat	float
8	土壤热通量	Soil_heat	float
9	显热通量	xianre	float
10	潜热通量	Latent_heat	float
11	日蒸散发	LEday	float

(3) 水文气象数据

采用 SEBAL 地表能量平衡模型、彭曼模型,以及互补相关模型中均利用到水文气象数据。气象数据存储是将每个气象站气象信息进行保存,文件命名根据气象站名称定义,程序运行时通过利用研究区域矢量边界坐标范围查找对应经纬度范围内的气象站点,根据气象站 ID 读取对应气象站文本文件进行反演操作。以编码、站 ID、站名、经度、纬度、高程为字段在数据库中设计站点信息表。

2. 1. 3 遥感模型与水热模型集成

根据系统功能的需求,本系统源数据涉及到大量遥感数据资料、常规气象资料。数据处理与输出需要利用遥感图像处理技术、GIS 技术、数据库管理技术、软件组件技术与专业水文模型。如何将遥感模型与水热模型集成起来是研究重点。

系统利用 ENVI/IDL 语言和具有定制强大空间分析功能的 ArcGIS Engine<sup>[12-14]</sup>,在 C# 整合下进行水热模型算法封装。遥感数据预处理与运算均通过 ENVI/IDL 语言执行,而 ArcGIS Engine 主要承担流域提取与水文响应单元划分等空间分析的任务<sup>[15-16]</sup>。由遥感数据在 SEBAL 模型下反演的地表蒸散发参数<sup>[17-18]</sup>,结合气象数据和日降水数据进行空间数据插值的结果,划分蒸散发响应单元,完成空间尺度转化(如图 2 系统集成框架图)。最后将反演出的实际蒸散发与由水量平衡的 Thorn-

thwaite 反演出的蒸散发结果进行验证分析。水热模型关键参数由 C# 提供外部用户交互窗口输入, 计算过程自动化, 实现了遥感模型与水热模型的高度集成。

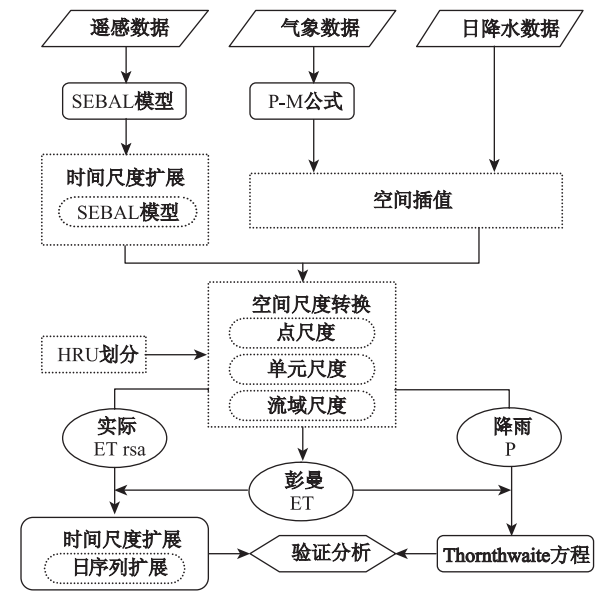


图 2 系统集成框架图

Fig. 2 Structure frame of system integration

2.2 系统关键技术与集成

IDL(Interactive Data Language)语言是面向矩阵操作、遥感影像开发的交互式数据语言<sup>[19]</sup>。ENVI是以IDL语言开发的遥感应用软件, 针对遥感影像基本操作封装了一系列函数供用户调用, 减少用户从底层进行开发的麻烦。IDL 7.0 可以与标准 C#、C、C++、Java、Delphi 等高级语言进行混合编程。较为常用的混合编程方法为直接调用 IDLDrawWidgetActiveX 控件。

考虑到 IDL 在 GUI 界面设计的局限性<sup>[20]</sup>, 结合 C# 语言可视化开发的特点, 采用 Visual Studio 2008 开发平台进行界面设计。将 ENVI/IDL 开发函数和 C# 语言充分集成, 实现两者的交互利用, 开发中使用到可视化控件 IDLdrawwidget 和非可视化控件 COM\_IDL\_Connect。通过该组件调用 ENVI/IDL 二次开发函数, 将水热模型集成于系统中, 成功实现系统功能。

利用 Arcgis Engine(简称 AE)在图层操作及空间分析方面的优势, 系统通过将 IDL、AE、C# 语言充分集成<sup>[21-23]</sup>实现整个系统的开发(图 3 技术架构图)。IDL 组件接收用户交互输入的参数与数

据, 以后台运行方式完成遥感影像处理与计算。ArcGIS Engine 利用其强大的 GIS 功能, 提取 GIS 数据结合其自带的函数与工具, 实现对专题数据产品的基本操作、流域提取和蒸散发响应单元划分。C# 不仅承担了用户交互界面的任务, 还必须设计集成水热模型。它通过调用 IDL 编写的二次开发函数与过程文件, 提取相应数据库中的文件与数据, 规范数据读写顺序, 利用水热模型中的算法实现地表蒸散发参数反演与验证。IDL、AE 与 C# 的集成能够很好地完成系统设计需求, 三者相辅相成, 能够在很短的开发周期内以极低的开发成本完成水文模型与遥感监测系统的集成。

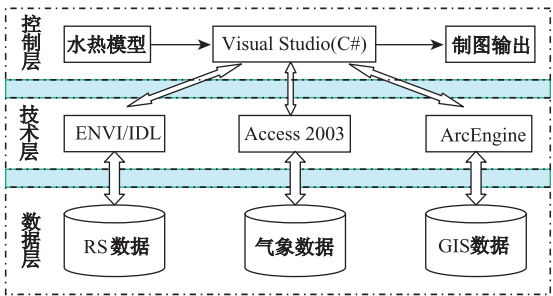


图 3 技术架构图

Fig. 3 Technical architecture diagram

3 黄河三花间地表蒸散发遥感监测系统的

应用

黄河三花间(三门峡—花园口区间)处于黄河中游下端, 是我国中部地区主要的半干旱区。该区域地表类型复杂, 春季易干旱, 夏季多暴雨。以 2002 年 8 月至 2009 年 08 月期间的多幅黄河三花间 MODIS 遥感影像为例, 建立地表蒸散发遥感监测系统。设计分为主菜单、鹰眼区、图层控制栏、查询与渲染控制栏、主界面、制图输出等多个部分(图 4)。

根据系统需求设计 9 大主菜单分别为: 基本操作、MODIS 影像预处理、地表参数反演、地表蒸散发反演、时间尺度扩展、空间尺度扩展、蒸散发验证、数据统计分析和批处理(图 5)。

系统具有 3 种蒸散发参数的反演模型, 分别是: SEBAL 模型、桑斯维特模型和互补相关模型。并在此基础上进行了反演结果的尺度扩展<sup>[24]</sup>与模型验证<sup>[25]</sup>。尺度扩展分为空间尺度扩展与时间尺



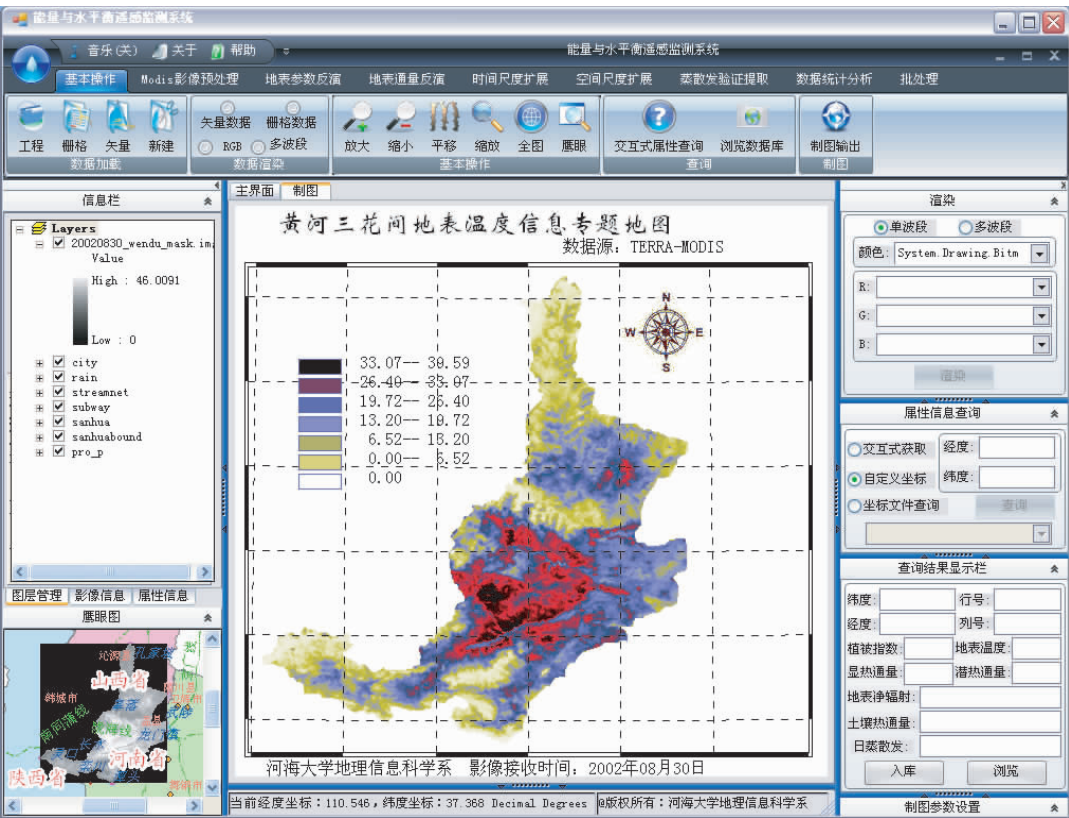


图 4 黄河三花间能量与水平衡遥感监测系统主界面图

Fig. 4 Main interface of the system



图 5 主菜单示意图

Fig. 5 System main menu

度扩展。空间尺度扩展主要方法为依据叠加多图  
层权重比划分蒸散发响应单元。时间尺度扩展划  
分为瞬时到日与日到日序列的扩展。瞬时到日尺  
度的扩展系统中主要采用谢贤群正弦曲线法,而日  
序列的扩展采用蒸发比不变法。系统还具有完善  
的统计分析功能<sup>[26]</sup>。除了以表格、图形或公式的形  
式进行直方图统计分析、相关性分析、回归分析,比  
较各参数之间的相互关联性外,同时可以对反演后  
专题数据从时间和空间分布上进行分析,提供根据  
自定义日期范围动态显示反演参数变化情况,对统  
计数据进行查询,实现专题数据产品的制图输出。  
利用回归分析模块,可对多项计算成果进行回归分  
析。如图 6 所示,将地表温度与日蒸散发进行回归  
分析为例,自动获取其回归方程,回归系数  $R^2$  为

0.76。呈负相关性。负相关主要原因是水分胁迫  
作用,地表温度较高的地方,由于其水分不足,导致  
蒸散量下降。蒸散发检验模块用于验证在不同尺  
度下的特定时间段反演精度,实验中选取 SEBAL  
蒸散发为标准,图 7 为 SEBAL 模型和桑斯威特模  
型在五月份单元尺度下蒸散发量反演结果散点图,  
其斜率趋近于 1,回归系数  $R^2$  为 0.8456。不难看出  
SEBAL 模型得出的实际蒸散和桑斯威特模型得出  
的结果具有很好的相关性,其截距也正好显示出桑  
斯威特模型因季节原因所产生的偏差。通过该模  
块可以对比不同时间尺度与空间尺度下的模型验  
证精度。从整体上来说,单元尺度下,SEBAL 蒸散  
发估算值和桑斯威特水量平衡方法蒸散发量估算  
值的拟合程度,整体好于 SEBAL 蒸散发估算值和

互补相关模型蒸散发量估算值的拟合程度。图 8 即为蒸散发验证主模块图,采用不同的绘图方式(图中以直线为例),通过选择不同尺度参数,查询 3 种蒸散发模型获取的蒸散发量估算值相关程度。系统专门设计了统计报表制作模块,该模块通过选择监测影像,将根据该期影像自动反演得到的各种专题数据信息和专题图生成监测报告(图 9),从专题数据产品及统计信息表中可以清晰地反映出各地表参数的空间分布范围及影响程度。

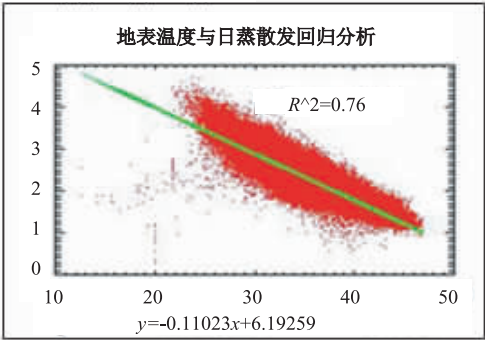


图 6 回归分析图  
Fig. 6 Regression analysis

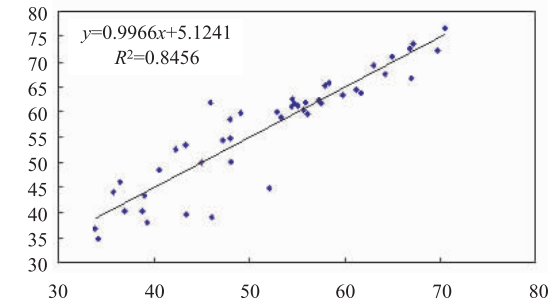


图 7 蒸散发量反演结果散点图  
Fig. 7 Scatter plots of Eta

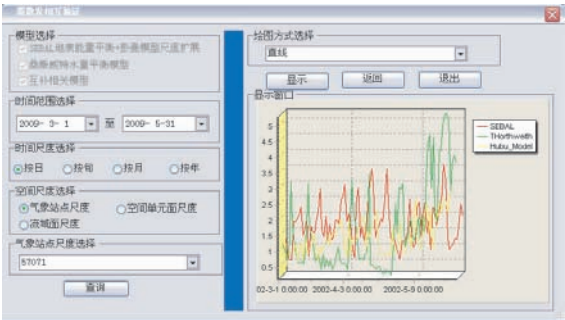


图 8 蒸散发验证主模块图  
Fig. 8 Verification of Eta

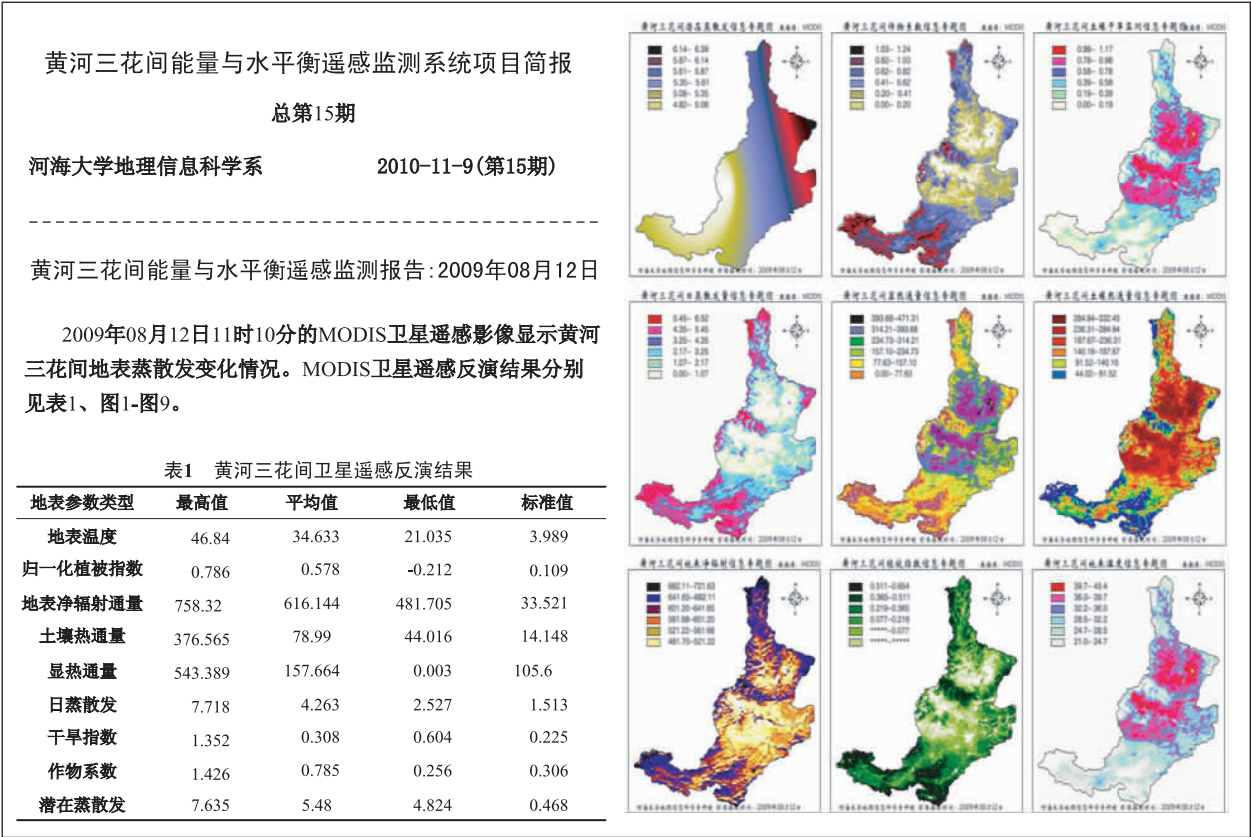


图 9 黄河三花间能量平衡与水平衡遥感监测报告  
Fig. 9 Remote sensing monitoring report of Energy and Water Balance in Yellow River Sanhuajian basin

## 4 结语

系统针对 MODIS 原始影像,从影像的几何校正、辐射定标等基本预处理操作到各种地表参数及通量信息提取、模型计算,以及专题地图的编制与监测报告的发布建立一整套业务化流程,实现了从数据到产品,再到图像的完全自动处理,达到遥感监测实效性要求,形成了针对地表蒸散发遥感监测的技术解决方案。经测试,采用蒸散发反演批处理模块,从几何校正开始到监测报表的制作,整个业务化流程执行过程只需不到 3 分钟时间,反演结果精度与采用其他遥感软件反演结果吻合,在明显提高影像处理效率的同时还保证了结果的精度,这对多时间分辨率的 MODIS 影像的应用,具有很大的实用价值和现实意义。反演结果在蒸散发检验模块中可以看出大致趋势相同,在部分时间段采用不同模型反演的结果会有较大差异,这取决于用户对尺度与模型的选择。

## 参考文献:

- [1] Widmoser P. 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] 高彦春, 龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展[J]. *遥感学报*, 2008, 12(3): 515-528.
- [4] 马荣华. 湖泊水环境遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [5] 韩雪, 彭国照. 地表蒸散发遥感监测的进展及问题[J]. *高原山地气象研究*, 2009, 29(2): 81-84.
- [6] 王甦, 江南, 胡斌. 基于 IDL 语言的太湖蓝藻水华遥感监测信息系统设计[J]. *遥感信息*, 2010(2): 59-64.
- [7] 杨建洪, 陈艳拢, 赵冬至, 等. 赤潮卫星遥感监测系统软件构建[J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(2): 78-81.
- [8] 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.
- [9] 李昆, 王洒. 基于 IDL 的黑河调水遥感监测系统[J]. *信息技术*, 2009(6): 54-55.
- [10] 邓世赞, 张友静, 张子衡, 等. 基于 IDL 的 MODIS 影像地表蒸散发参数反演系统[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(4): 40-44.
- [11] 熊金国, 王丽涛, 王世新, 等. 植被水分遥感监测处理系统的建立及应用[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(5): 1819-1831.
- [12] 南锋. 基于 ArcGIS Engine 与 C#.net 的地图鹰眼功能的实现[J]. *信息技术*, 2009(3): 27-28.
- [13] 冯锐, 纪瑞鹏, 武晋雯, 等. 基于 ArcGIS Engine 的干旱监测预测系统[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(20): 366-372.
- [14] 李俊. 在 C# 中运用 ArcGIS Engine 的 ActiveX 控件开发程序[J]. *软件技术*, 2010(5): 71-72.
- [15] 张旭, 蒋卫国, 周廷刚, 等. GIS 支持下的基于 DEM 的水文响应单元划分——以洞庭湖为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2009, 25(4): 17-21.
- [16] 舒栋才. 基于 DEM 的山地森林流域分布式水文模型研究[D]. 四川大学, 2005, 11.
- [17] 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.
- [18] Bastiaanssen W G M. SEBAL-based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 229(1/2): 87-100.
- [19] 韩培友. IDL 可视化分析与应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [20] 郭建文, 冯敏, 尚庆生, 等. IDL 在分布式 GIS 系统中的应用研究[J]. *计算机应用研究*, 2007, 24(5): 220-222.
- [21] 朱元励. 基于遥感和模型同化的水稻生长监测预测技术研究[D]. 南京农业大学, 2009, 6.
- [22] 汤泉, 牛铮. 基于 IDL 与 ENVI 二次开发的遥感系统开发方法[J]. *计算机应用*, 2008(28): 270-276.
- [23] 郭建文, 冯敏, 尚庆生, 等. IDL 在分布式 GIS 系统中的应用研究[J]. *计算机应用研究*, 2007, 24(5): 220-222.
- [24] 吴炳方, 邵建华. 遥感估算蒸腾蒸发量的时空尺度推演方法及应用[J]. *水利学报*, 2006, 37(3): 286-292.
- [25] 刘建梅, 王安志, 刁一伟, 等. 分布式模型在流域蒸散发模拟中的应用与验证[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(1): 45-50.
- [26] 吕竞. 水环境系统分析中多元统计分析方法的应用——以成都市地表水水质监测数据综合分析为例[D]. 四川大学, 2006, 5.

## Developing Land-surface Evapotranspiration Remote Sensing Monitoring System Using the Component Technology

QIAN Zhiqi<sup>1</sup>, ZHANG Youjing<sup>1,2</sup>, DENG Shizan<sup>1</sup>, FANG Yingying<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>1</sup>

(1. *School of Earth Sciences and Engineering of Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** For the requirements of integrating the Energy and Water Balance model into the remote sensing model, in this paper we developed a basic technological process of land-surface evapotranspiration remote sensing monitoring system using C# language mixed with ENVI/IDL (which flexibility offered digital image processing) and ArcGIS Engine (which has powerful functions in spatial analysis), and designed the hydrometeorological and remote sensing information database and the pattern of integrating the Energy and Water Balance model into the remote sensing model. Then we researched the method of evapotranspiration (ET) unit derived and the function of regional ET evaluation based on multi spatial and temporal scales. By all of above, integration and application of the Energy and Water Balance model into the remote sensing model were implemented. The study area of this research is Sanhuajian basin which located in Yellow River. The process experimental data is MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) image which date from August 2002 to August 2009. The system extracted the parameters related to ET which include surface temperature, water index, vegetation index, impervious surface and etc, and completed part of the land surface ET parameter extraction task. By using the modul of ET processing batch the system achieved the requirement of the ET derived completely. The report generated by the statistical report modul displayed the basic thematic statistical information and the remote-sensing monitoring thematic map information. The results show that this remote sensing monitoring system has the advantages of short execution time and high efficiency and friendly human-computer interaction, and it is helpful to solve the crux of complication processes in land surface ET estimation using routine remote sensing softwares, and it has been of great practical value.

**Key words:** remote-sensing monitoring system; land-surface evapotranspiration; integration; C#; ENVI/IDL