

基于双层模型的沙河流域蒸散发定量遥感估算

占车生¹, 尹 剑^{2*}, 王会肖², 陈少辉¹

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环与地表过程重点实验室 北京 100101;

2. 北京师范大学 水科学研究院 北京 100875)

摘要: 论文以北京市沙河流域为研究区, 选择 1999—2007 年不同季节典型日的 TM/ETM+ 数据, 辅助相关气象观测资料, 以地表蒸散发遥感反演双层模型为基础, 构建了估算沙河流域地表日蒸散发反演系统。该系统包括三部分: 基于双层模型的蒸发比估算; 日净辐射总量估算; 基于蒸发比不变法的日蒸散发估算。模拟的典型日序列中, 春季晴日流域日均蒸散发约为 2.28 mm、夏季 2.97 mm、秋季 1.59 mm、冬季 0.5 mm; 以林地为主的流域上游山区日蒸散发普遍高于以居民地和农田为主的下游平原区, 上下游春、秋、冬季空间差别较大, 夏季较小。估算结果与贾贞贞等、徐自为等利用大孔径闪烁仪和涡动相关仪的观测值对比, 相对误差介于 0 到 16% 之间, 平均相对误差为 11.1%, 均方差为 0.77 mm, 精度较高。

关键词: 定量遥感; 蒸散发; 双层模型; 蒸发比; 沙河流域

中图分类号: P332.2; TP79 文献标志码: A 文章编号: 1000-3037(2013)01-0161-10

蒸散发(ET)包括土壤蒸发和植被蒸腾,定量遥感 ET 模型是当前计算区域蒸散发的有效途径^[1]。根据计算蒸散发和地表热通量过程中是否对湍流热通量划分,将相应的遥感模型分为单层模型和双层(多层)模型^[2]。单层模型估算蒸散发时,假设下垫面为均匀致密的“大叶子”。大部分模型需要在遥感影像中选择干点和湿点,运用空气和地表温度的实验方程消去难以获得的空气动力学温度参数,适合植被茂密地区应用。估算半湿润、植被不太茂密或半干旱、植被稀疏地区的蒸散发时,使用双层模型将土壤和植被分开考虑更为合理^[3]。Shuttleworth 等首先提出了双层 S-W 模型^[4],Norman 等^[5]将其简化为适应遥感应用的平行模型(TSEB)。近 10 a 来这种平行模型广泛应用在地表蒸散发估算中^[6-8]。然而,平行模型依赖假设和经验确定一些参数,影响了估算的精度,限制了推广应用^[9]。此外,该模型在分解净辐射通量时主要采用 Beer 定律。当土壤和植被的反照率和辐射温度相差较大时,会造成较大误差和不确定性。

针对上述问题,我国学者张仁华等^[10]从三角形或梯形法的理论出发,提出了一种新型的双层模型^[11],并在 2008 年进行了算法改进:利用像元排序对比法结合标定场确定“混合地表温度(反照率)-植被覆盖度”散点图理论边界,进而分解出土壤/植被的温度和反照率;分解混合像元的反照率时结合分层能量切割算法,可以分解混合像元的净辐射通量。模型以研究区内存在土壤湿度和植被覆盖度变化为前提,保证了复杂地貌情况下的应用。田静等^[12]以华北

收稿日期: 2011-12-30; 修订日期: 2012-06-11。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40901023, 41101329); 国家自然科学基金重点项目(50939006)。

第一作者简介: 占车生(1975-)男,湖北人,副研究员,博士,主要从事水水文水资源研究。E-mail: zhances@ig-snr.ac.cn

* 通信作者简介: 尹剑(1984-)男,山西人,博士研究生,研究方向为环境遥感。E-mail: yinjianbnu@163.com

平原为例,首次对该模型做了尝试,较好地反演了区域瞬时蒸散发通量。

本文基于张仁华等^[10]的PCACA双层模型估算区域瞬时蒸发比,结合改进的日净辐射总量估算模型^[13]和蒸发日尺度扩展模块,构建了估算地表日蒸散发反演系统。以北京市沙河流域为例,选择了1999—2007年不同季节18个典型日的TM/ETM+数据,辅助相关气象观测资料,利用该模型估算了流域的日蒸散发,并用观测值对反演结果进行了验证,同时分析了流域蒸散发的时空分布。

1 研究区概况

沙河流域位于北纬 $40^{\circ}00' \sim 40^{\circ}30'$ 和东经 $115^{\circ}50' \sim 116^{\circ}20'$ 之间,流域面积约 $1\,125\text{ km}^2$ 。该流域为平原丘陵地形,地势西北高,东南低,海拔最高 $1\,342\text{ m}$,最低 33 m ,山区面积约占流域面积的75%左右。其地理位置见图1。沙河流域属温带大陆性季风气候,特点是冬寒晴燥,夏热多雨,春旱多风,冬夏两季气温变化较大。多年平均气温为 $25.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,冬季1月平均气温为 $-4.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,年极端最高气温 $40.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低气温为 $-19.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。多年平均相对湿度为60%,年际间在55%~67%间变化。流域内的小汤山通量观测站和流域附近的密云通量观测站实时测定地表热通量。

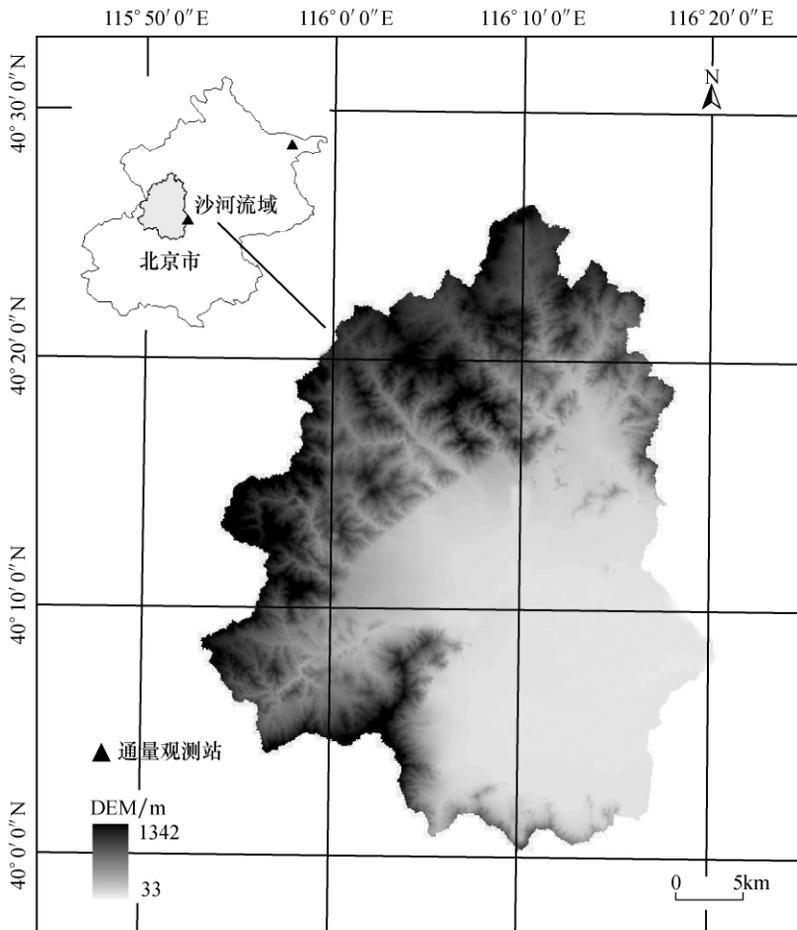


图1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch map of the study area

2 数据和方法

2.1 数据来源和预处理

研究收集了沙河流域内的小汤山站、与流域相邻的密云站等多个通量观测站的观测数据, 以及中国气象局发布的气象数据, 包括水汽压、气温、日照时数等。

选取研究区 18 景成像质量较好、轨道号为 123/32 的 Landsat TM/ETM+ 遥感影像作为主要数据源, 对影像进行裁剪、几何校正与配准、辐射纠正等预处理, 利用 FLAASH 大气校正模型^[14] 消除可见光/近红外波段的大气影响。通过 3、4 波段计算出归一化植被指数 NDVI, 进而计算出植被覆盖度 f 。

采用梁顺林^[15] 根据大气辐射传输模型建立的 Landsat TM 地表反照率估算的公式, 利用 Landsat 遥感数据 1 至 7 波段的地表反射率信息, 计算出 Landsat 的宽带地表反照率 α 。

根据地表热辐射传输方程推导出的单窗算法^[16] 反演研究区地表温度 T 。该算法简单可行并且能保持较高精度, 优点在于只需要 3 个参数: 地表比辐射率、大气透射率和有效的大气平均作用温度。

2.2 基于双层模型的地表蒸发比计算

地表瞬时蒸发比 Λ 可定义如下:

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{R_n - G} \quad (1)$$

式中: λE 为地表潜热通量, R_n 、 G 分别为净辐射通量和土壤热通量。土壤热通量与地表净辐射通量可采用如下经验关系式^[10, 17]。

$$G \approx 0.3(1 - 0.9f)R_n \quad (2)$$

本文通过 PCACA 模型分别反演出 λE 和 R_n , 从而获取瞬时蒸发比 Λ 。PCACA 模型的核心算法包括分解地表温度的像元排序对比法和分解地表可供能量的分层能量切割算法^[10]。像元排序对比法是根据“混合地表温度-植被覆盖度”的散点图包络线呈梯形这一特点, 结合干点和湿点定标场的参数测定值, 推算到 4 个极端的混合像元真实温度, 从而确定在当时气象和生态条件下的梯形框架, 并确定散点图理论边界, 再利用线性内插方法得出混合温度与土壤温度 T_s 和植被温度 T_v 的关系, 进而分解组分温度。具体如下:

根据混合像元理论, 混合地表温度 T_m 分解方法的基本方程为:

$$\sigma \varepsilon_m T_m^4 = \sigma \varepsilon_v f T_v^4 + \sigma \varepsilon_s (1 - f) T_s^4 \quad (3)$$

ε_m 、 ε_v 和 ε_s 分别为混合像元、植被和土壤表面的比辐射率, σ 为波尔兹曼常数, f 为混合像元的覆盖率。式(3)对覆盖率 f 求导, 并做合理的简化得到:

$$\frac{dT_m}{df} \approx T_v - T_s \quad (4)$$

dT_m/df 是散点图梯形框架中等土壤湿度线的斜率, 通过确定“混合地表温度-植被覆盖度”散点图的理论边界(“干边”和“湿边”)后得到^[10]。“理论干边”的确定主要通过能量平衡法反推计算, “理论湿边”则采用大范围水体的表面温度定位法实现, 参见文献[12]。联立(3)和(4)解出 T_v 、 T_s , 实现了混合地表温度的分解。地表混合反照率 α 可用类似的方法分解为植被反照率 α_v 和土壤反照率 α_s 。

分层能量切割算法的本质就是求算土壤波文比 β_s 和植被波文比 β_v , 再利用波文比能量平衡法切割地表可利用能量, 获得土壤蒸发和植被蒸腾的过程。根据 Moran 等给出的水分

亏缺指数(WDI, Water Deficit Index)与蒸发比的关系^[18],进一步推导,可以获得波文比计算方法^[19]。再结合“地表温度-植被覆盖度”散点图,根据公式(5)计算出波文比:

$$\beta_{Si} \approx \frac{T_{SH} - T_{SL}}{T_{SH} - T_{Si}} - 1 \quad (5)$$

其中: T_{SH} 和 T_{SL} 表示研究区内等覆盖率像元的最高土壤温度和最低土壤温度, β_{Si} 和 T_{Si} 表示单个像元的土壤波文比和土壤温度。植被波文比的求解类似。

根据地表长波辐射和短波辐射平衡计算土壤净辐射通量 R_{sn} 和植被净辐射通量 R_{vn} ,再采用线性混合理论通过覆盖率加权得到地表净辐射通量 R_n ^[19]:

$$R_n = fR_{vn} + (1-f)R_{sn} \quad (6)$$

从而,根据波文比能量平衡法切割地表可利用能量,得到瞬时土壤蒸发 λE_s 和瞬时植被蒸腾 λE_v 。进一步计算出潜热通量 λE :

$$\lambda E_s = \frac{R_{sn} - G}{1 + \beta_s}, \quad \lambda E_v = \frac{R_{vn}}{1 + \beta_v} \quad (7)$$

$$\lambda E = f\lambda E_v + (1-f)\lambda E_s \quad (8)$$

2.3 日净辐射总量计算

日地表净辐射 R_{daily} 是一天内地表吸收的有效能量,等于日净短波辐射和日净长波辐射之差。

2.3.1 日净短波辐射的计算

日净短波辐射 R_s 通过日地表太阳辐射 R_{sun} 和地表反照率 α 计算: $R_s = (1 - \alpha)R_{sun}$ 。

R_{sun} 可以用天文辐射量及大气透射率计算,大气透射率由晴天的大气透过率以及天空云量估算,用日照时数和可照时数之比确定云的影响,晴天大气透过率和云透过率用经验参数来代替^[20]:

$$R_{sun} = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right)W_d \quad (9)$$

式中: n 为实际日照时数, N 为最大日照时数, n/N 为相对日照时间(0~1), W_d 为日天文辐射量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), a_s 和 b_s 为经验回归系数,参考北京地区地面辐射的研究^[21], a_s 和 b_s 的推荐值分别为0.56和0.16。

日天文辐射量(W_d)的计算:

$$W_d = \frac{D}{\pi} \left(\frac{1}{\rho_0}\right)^2 I_0 (\omega_0 \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega_0) \quad (10)$$

式中: D 为一天的时间长度; I_0 为太阳常数,为日地处于平均距离时,大气上界与太阳光垂直的单位面积单位时间所接收的太阳辐射能, $I_0 = 0.082 \text{ MJm}^{-2} \text{ min}^{-1}$; ω_0 为太阳时角; φ (rad)为地理纬度; δ (rad)为太阳赤纬,求日总量时 φ 和 δ 可看作常量; $(1/\rho_0)^2$ 为日地距离订正系数(地球轨道偏心率订正因子),根据级数表达式^[22]结合日角求出。

2.3.2 日净长波辐射的计算

地面与大气逆辐射之差称为长波辐射。计算日净长波辐射大都采用Penman公式、Howard-Lloyd公式和别尔梁德公式。参照我国学者徐兴奎等^[23-24]对3种公式的应用和研究,当水汽压在0~12.25 hPa时,选择别尔梁德公式;当水汽压在12.25~27.04 hPa时,选择Howard-Lloyd公式;当水汽压在27.04 hPa以上时,选择Penman公式。

2.4 日蒸散发计算

本文选择在地表蒸散发时间扩展中一种常用的方法——蒸发比不变法^[25]。其基本假设是,在能量平衡中,蒸发比(潜热通量 λE 与可利用能量 $R_n - G$ 之比)在一天内是相对稳定的^[25]。

$$\frac{\lambda E_d}{F_d} \approx \frac{\lambda E}{F} = \Lambda = \frac{\lambda E}{R_n - G} \quad (11)$$

式中: λE_d 是一天累计蒸散发量, F_d 是地表可利用能量的一天累计值, λE 和 F 是白天某个瞬时的蒸散发速率和能量通量。在获得蒸发比 Λ 、日地表净辐射 R_{daily} 等参数的基础上,对式(11)作 24 h 积分(白天和晚上的土壤热通量 G 相互抵消,相对应的积分项可以忽略),得到日蒸散发量:

$$ET_{daily} = \frac{\Lambda R_{daily}}{\lambda} \quad (12)$$

式中: ET_{daily} 为日实际蒸散发量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), R_{daily} 为日净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), λ 为蒸发潜热 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$), $\lambda = (2.501 - 0.023 61 T_0) \times 10^3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$, T_0 为日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)。

3 结果验证及分析

3.1 结果验证

目前尚没有一种技术手段能够实现土壤蒸发和植被蒸腾独立的地面连续观测,但为了验证模型在沙河流域的应用,采用验证日地表总蒸散的方法来衡量模型的估算精度。选择位于研究区内的小汤山通量观测站的观测数据与观测站所在像元对应的 ET 反演结果进行验证,并结合与沙河流域临近的密云通量观测站的观测值辅助验证。日观测站数据为涡动相关系统和大孔径闪烁仪测得的瞬时通量经过日尺度转换后的日蒸发结果^[26-27]。

需要指出的是,蒸散发遥感反演结果的地面验证受空间尺度不匹配和能量平衡方程不闭合等因素影响,会降低其验证精度。根据卢俐等^[26]和 Kohsiek 等^[27]研究,距地面 2 m 高的涡动相关系统和大孔径观测仪的通量观测风浪区约 200 m 至 900 m。本研究使用 30 m 空间分辨率的 TM/ETM+ 遥感数据,削弱了空间尺度不匹配的影响,可利用这些仪器观测数据进行校验。根据田静等^[12]、李正泉等^[30]研究表明,地表能量平衡方程闭合度 $[\eta = (H + \lambda E) / (R_n - G)]$ 大于 0.8 的模拟结果可信度较高。经计算,本研究中 18 个典型日的模拟结果能量闭合度均大于 0.8,因此遥感反演估算的日蒸散发结果是有效的,可用于模型验证。

小汤山站位于沙河流域下游农田区,实验场地是一长 1 000 m,宽 310 m 的平坦地表。下垫面以冬种夏收或夏种秋收农作物为主,日蒸散发在 0 ~ 3.5 mm 间,春夏交替时达到最大。参考观测结果^[26-27]小汤山站观测值与在研究区内对应像元模拟值对比显示(图 2):日蒸发模拟观测相对误差介于 0 到 16% 之间,相对误差的平均值为 11.1%,均方根误差为 0.77 mm,相关系数为 0.97。模拟精度较高。

密云观测站在海河流域西北部密云县新城子镇,代表海河流域北部山区类型。下垫面主要为果树和玉米/裸地,为典型的山区园地、农作物混合下垫面。观测仪器包括大孔径闪烁仪、涡动相关仪及自动气象站等。其气候特点、下垫面特征与沙河流域相似,距离也较近,选择其通量观测进行辅助对比。参考观测结果^[26-27]密云站日蒸发观测值与沙河流域日均蒸发模拟值对比显示:两组数据相对误差平均值为 13%,均方根误差为 1.45 mm,相关系数 0.95,具体的精度评价如图 3 所示。

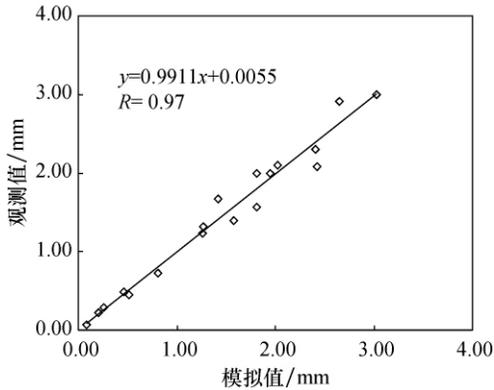


图2 日蒸散发模拟值与观测值对比(小汤山站)

Fig. 2 The simulated daily ETs compared with the observed values (Xiaotangshan Station)

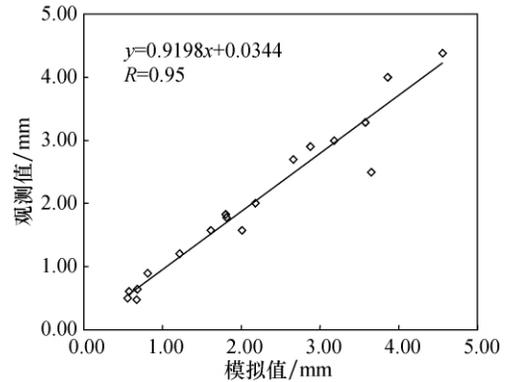


图3 日蒸散发模拟值与观测值对比(密云站)

Fig. 3 The simulated ETs compared with the observed values (Miyun Station)

3.2 蒸散发时空分析

遥感模型反演的 18 个晴空典型日的蒸散发,较均匀地分布于各季节,春季的典型日蒸散发平均值约为 2.28 mm;夏季的平均值约为 2.97 mm;秋季和冬季平均值约为 1.59 mm 和 0.5 mm。图 4 反映了沙河流域各季节代表日的日蒸散发情况。

参考区域土地利用和图 4 中春、夏、秋、冬各季节代表日的蒸散发分布得出,位于西北部上游山区林地日蒸散发全年均高于其他区域,是流域的主要耗水区;下游平原区主要为城镇用地、农业旱地,平均蒸散发较小;上、下游蒸散发差别除夏季较小外,其他季节相对较大;介于平原区农田和山区林地之间的居民地是一年之中蒸散发耗水量最小的地区,此区域内的 18 个晴空代表日的蒸散量均不超过 2.5 mm,平均值约为 2.3 mm。在 18 d 的模拟序列中,上游山区林地除冬季外其他季节日蒸散量均大于等于 2.5 mm;下游仅农田在夏季日蒸散发可达到 3 mm,其他季节蒸发均较低。综合来看,上游山区植被覆盖度大是该区域蒸散发耗水量大的主要原因;下游地区以城镇居民地为主,蒸散发保持在相对较低的水平。

4 结论与讨论

基于双层遥感模型建立沙河流域日蒸散发遥感反演系统估算结果表明,双层模型估算的日蒸散发结果和观测值的偏差较小,说明该反演系统方案科学可行,适用于估算复杂地形情况下的日尺度蒸散发。通过对比分析沙河流域不同季节典型日的蒸散量估算结果,位于西北部上游山区林地日蒸散发高于其他区域,下游平原区蒸发最小。模拟序列中,春季的晴日流域平均蒸散发约为 2.3 mm,夏季约为 3 mm,秋季约为 1.6 mm,冬季约为 0.5 mm。

本文应用双层模型和日净辐射总量估算相结合,拓展日蒸发尺度,模拟值与测量值吻合较好,为更大时间尺度的实际蒸发模拟奠定了基础。但是,在模型输入的非遥感参数的空间扩展还需进一步加强,例如,区域扩展气象台站的空气温度和风速。今后拟提高辐射温度和真实表面温度的反演精度,在地物分类技术的支持下,深入发展非遥感参数的动力学空间扩展方法,并进一步探讨瞬时潜热通量向日尺度蒸散发扩展的新方法,提高日蒸发总量的反演

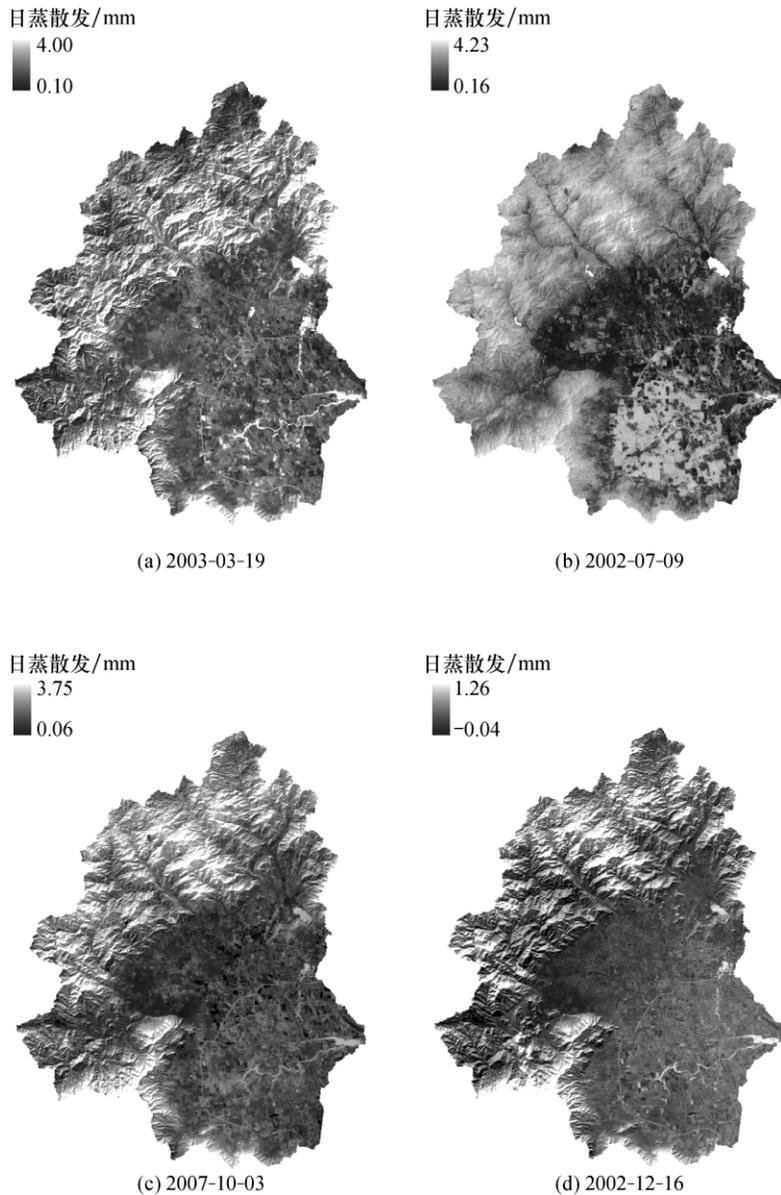


图4 沙河流域春(a)、夏(b)、秋(c)、冬(d)代表日蒸散发分布

Fig. 4 The daily ET distribution maps in spring (a) , summer (b) , autumn (c) and winter (d) of Shahe River Basin

精度。同时,笔者也计划在不同气候区域进行模拟,对模型在不同气候类型地区的估算能力进行对比分析,以深入理解不同气候特征对陆面实际蒸散发过程的影响,认识蒸散发变化过程及其与各影响因素之间的关系,理解气候变化条件下的水循环特征,实现区域水资源的可持续开发利用。

参考文献(References):

- [1] LI Zhao-liang, TANG Rong-ling, WAN Zheng-ming, *et al.* A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data [J]. *Sensors* 2009 9(5): 3801-3853.
- [2] 高彦春,龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展[J]. 遥感学报 2008, 12(3): 517-528. [GAO Yan-chun, LONG Di. Pro-

- gress in models for evapotranspiration estimation using remotely sensed data. *Journal of Remote Sensing* ,2008 ,12(3) : 517-528.]
- [3] 张万昌,高永年. 区域土壤植被系统蒸散发二源遥感估算[J]. 地理科学 2009 29(4) : 523-528. [ZHANG Wan-chang ,GAO Yong-nian. Estimation of regional evapotranspiration using two source energy balance model and ETM + imagery. *Scientia Geographica Sinica* 2009 29(4) : 523-528.]
- [4] Shuttleworth W J ,Gurney R J. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crop [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* ,1990 ,116: 497-519.
- [5] 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(3/4) : 263-293.
- [6] 隋洪智,田国良,李付琴. 农田蒸散双层模型及其在干旱遥感监测中的应用[J]. 遥感学报 ,1997 ,1(3) : 220-224. [SUI Hong-zhi ,TIAN Guo-liang ,LI Fu-qin. Two-layer model for monitoring drought using remote sensing. *Journal of Remote Sensing* ,1997 ,1(3) : 220-224.]
- [7] 潘竞虎,刘春雨. 基于 TSEB 平行模型的黄土丘陵沟壑区蒸散发遥感估算[J]. 遥感技术与应用 2010 25(2) : 183-188. [PAN Jing-hu ,LIU Chun-yu. Retrieving evapotranspiration of loess hilly-gully region using TSEB Parallel Model based on remote sensing image. *Remote Sensing Technology and Application* 2010 25(2) : 183-188.]
- [8] YAO Wei ,HAN Min ,XU Shi-guo. Estimating the regional evapotranspiration in Zhalong wetland with the Two-Source Energy Balance (TSEB) model and Landsat7/ETM + images [J]. *Ecological Informatics* 2010 5: 348-358.
- [9] 刘雅妮,武建军,夏虹,等. 地表蒸散遥感反演双层模型的研究方法综述[J]. 干旱区地理 2005 28(1) : 65-71. [LIU Ya-ni ,WU Jian-jun ,XIA Hong ,et al. Summary of two-layer models on estimating evapotranspiration using quantitative parameters derived from remote sensing. *Arid Land Geography* 2005 28(1) : 65-71.]
- [10] 张仁华,孙晓敏,王伟民,等. 一种可操作的区域尺度地表通量定量遥感二层模型的物理基础[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学 ,2004 34(增 II) : 200-216. [ZHANG Ren-hua ,SUN Xiao-min ,WANG Wei-min ,et al. An operational regional-scale surface flux two-layer model of quantitative physical basis of remote sensing. *Science in China Series D: Earth Science* 2004 34(SII) : 200-216.]
- [11] Zhang R H ,Tian J ,Su H B ,et al. Two improvements of an operational two-layer model for terrestrial surface heat flux retrieval [J]. *Sensors* 2008 8: 6165-6187.
- [12] 田静,苏红波,孙晓敏,等. 遥感反演土壤蒸发/植被蒸腾二层模型在华北地区的应用[J]. 地理研究 2009 28(5) : 1297-1306. [TIAN Jing ,SU Hong-bo ,SUN Xiao-min ,et al. Application of an operational two-layer model for soil evaporation and vegetation transpiration retrievals in North China. *Geographical Research* 2009 28(5) : 1297-1306.]
- [13] 占车生,夏军. 中国陆面蒸散发量的遥感反演及时空格局[M]. 北京: 知识产权出版社 2009. [ZHAN Che-sheng ,XIA Jun. Remote Sensing Estimation of Evapotranspiration Quantity and Analysis of Space-time Structure over China. Beijing: Intellectual Property Publishing House 2009.]
- [14] 宋晓宇,王纪华,刘良云,等. 基于高光谱遥感影像的大气校正: 用 AVIRIS 数据评价大气校正模块 FLAASH [J]. 遥感技术与应用 2005 20(4) : 393-395. [SONG Xiao-yu ,WANG Ji-hua ,LIU Liang-yun ,et al. Atmospheric correction of hyper-spectral imagery: Evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data. *Remote Sensing Technology and Application* 2005 20(4) : 393-395.]
- [15] LIANG Shun-lin. Narrow band to broadband conversions of land surface albedo ,I: Algorithms [J]. *Remote Sensing of Environment* 2000 76: 213-238.
- [16] 覃志豪,ZHANG Ming-hua ,Arnon Karnieli,等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报 ,2001 56(4) : 456-466. [QIN Zhi-hao ,ZHANG Ming-hua ,Arnon Karnieli ,et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM 6 data. *Acta Geographica Sinica* 2001 56(4) : 456-466.]
- [17] 张仁华. 实验遥感模型及地面基础[M]. 北京: 科学出版社,1996. [ZHANG Ren-hua. Experimental Model and Ground-Based of Remote Sensing. Beijing: Science Press ,1996.]
- [18] Moran M S ,Clarke T R ,Inoue Y ,et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index [J]. *Remote Sensing of Environment* ,1994 49: 246-263.
- [19] Kustas W P ,Li F ,Jackson T J ,et al. Effects of remote sensing pixel resolution on modeled energy flux variability of croplands in Iowa [J]. *Remote Sensing of Environment* 2004 92: 535-547.

- [20] Hurtado E , Sobrino J A. Daily net radiation estimated from air temperature and NOAA-AVHRR data: A case study for the Iberian Peninsula [J]. *International Journal of Remote Sensing* 2001 22: 1521-1533.
- [21] 黄岩 毕坤. 基于 Elman 网络的地面太阳总辐射估算方法[J]. 安徽农业科学 2011 39(8): 4700-4702 4786. [HUANG Yan , BI Kun. Methods for estimating surface total solar radiation based on elman neural network. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* 2011 39(8): 4700-4702 4786.]
- [22] 左大康 周允华 等. 地球表层辐射研究[M]. 北京: 科学出版社 ,1991. [ZUO Da-kang , ZHOU Yun-hua , et al. Earth's Surface Radiation Research. Beijing: Science Press ,1991.]
- [23] 徐兴奎. 基于遥感和地理信息系统的中国地表能量特征分析[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所 ,1999. [XU Xing-kui. Analysis of Land Surface Energy Characteristics of China Based on RS and GIS. Beijing: Institute of Remote Sensing Application , CAS ,1991.]
- [24] 徐兴奎 隋洪智 田国良. 互补相关理论在卫星遥感领域的应用研究[J]. 遥感学报 ,1999 3(1): 54-59. [XU Xing-kui , SUI Hong-zhi , TIAN Guo-liang. Application and research of complementary relationship theory in remote sensing. *Journal of Remote Sensing* ,1999 3(1): 54-59.]
- [25] 辛晓洲. 用定量遥感方法计算地表蒸散[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所 ,2003. [XIN Xiao-zhou. Estimating Evapotranspiration Using Quantitative Parameters Derived from Remote Sensing. Beijing: Institute of Remote Sensing Application , CAS 2003.]
- [26] 贾贞贞 刘绍民 毛德发 等. 基于地面观测的遥感监测蒸散量验证方法研究[J]. 地球科学进展 2010 25(11): 1248-1260. [JIA Zhen-zhen , LIU Shao-min , MAO De-fa , et al. A study of the validation method of remotely sensed evapotranspiration based on observation data. *Advances in Earth Science* 2010 25(11): 1248-1260.]
- [27] 徐自为 刘绍民 徐同仁 等. 涡动相关仪观测蒸散量的插补方法比较[J]. 地球科学进展 2009 24(4): 372-382. [XU Zi-wei , LIU Shao-min , XU Tong-ren , et al. Comparison of the gap filling methods of evapotranspiration measured by eddy covariance system. *Advances in Earth Science* 2009 24(4): 372-382.]
- [28] 卢俐 刘绍民 徐自为 等. 不同下垫面大孔径闪烁仪观测数据处理与分析[J]. 应用气象学报 2009 20(2): 171-178. [LU Li , LIU Shao-min , XU Zi-wei , et al. Results from measurements of large aperture scintillometer over different surfaces. *Journal of Applied Meteorological Science* 2009 20(2): 171-178.]
- [29] Kohsiek W , Meijninger W M L , De Bruin H A R , et al. Saturation of the large aperture scintillometer [J]. *Boundary-Layer Meteorology* 2006 121: 111-126.
- [30] 李正泉 于贵瑞 温学发 等. 中国通量观测网络(China FLUX) 能量平衡闭合状况的评价[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学 2004 ,34(增 II): 46-56. [LI Zheng-quan , YU Gui-rui , WEN Xue-fa , et al. The status of energy balance closure assessment of China FLUX. *Science in China Series D: Earth Science* ,2004 ,34(SII): 46-56.]

The Regional Evapotranspiration Estimation Using A Two-layer Model Based on Quantitative Remote Sensing in Shahe River Basin

ZHAN Che-sheng¹, YIN Jian², WANG Hui-xiao², CHEN Shao-hui¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on the TM/ETM+ data and relevant meteorological data for typical days in different seasons during 1999-2007 in Shahe River Basin, we developed the land-surface evapotranspiration (ET) remote sensing retrieval system to estimate the daily ET in Shahe River Basin. The system is based on the two-layer ET model of quantitative remote sensing, which includes three parts: inversion of the evaporation fraction using two-layer model, calculation of total daily net radiation, and estimation of daily ET based on evaporation fraction method. The results show that the average daily ET of the typical days is about 2.28 mm in spring, 2.97 mm in summer, 1.59 mm in autumn, and 0.5 mm in winter. The ET of upstream areas covered by forest is higher than that of the downstream plain covered by settlements and farmland. In summer the difference of ET between the upper reaches and lower reaches is smaller compared to the other three seasons. Using the large aperture scintillometer and eddy correlation instrument, Jia, Xu, et al. got some observed values of ET in the Shahe River Basin. By comparing the observed data with the estimated data, we found the estimation system had a high precision with the relative error between 0 and 16% (mean error of 11.1%), and the variance of 0.77 mm.

Key words: quantitative remote sense; ET; two-layer model; evaporation fraction; Shahe River Basin