

基于遥感技术的地表蒸散业务化反演

周川^{1,2}, 牛铮¹

(1. 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 分析地表蒸散业务化反演的现状需求及所面临的困难, 从业务化运行的目标出发, 根据地表蒸散业务化反演的几点原则: 独立性、简洁性、普适性、尺度扩展性, 对现今较为常用的几种地表蒸散模型进行对比分析, 最终选取 Priestley-Taylor(PT) 模型作为核心方法, 建立地表蒸散业务化反演的运作技术流程。在 MODIS 数据和气象数据支持下, 以黑河流域为试验区, 对该方法和流程进行验证, 反演得到该流域地表日蒸散量。最后以 FAO56 Penman-Monteith 模型反演结果作为检验标准进行精度评价分析, 两种反演结果相关性达 0.880。较高的反演精度表明, PT 模型的选用和该技术流程的建立是合理的, 足以满足业务化反演的需求, 具有进一步的可操作性和实用性。

关键词: 地表蒸散, 遥感, Priestley-Taylor 模型, Penman-Monteith 模型, 业务化, 黑河流域

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.023

中图分类号: TP79: S161.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0124-07

周川, 牛铮. 基于遥感技术的地表蒸散业务化反演[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 124—130.

Zhou Chuan, Niu Zheng. Operational retrieving of land surface evapotranspiration based on remote sensing technology[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 124—130. (in Chinese with English abstract)

0 引言

地表蒸散是全球地表水循环的重要一环, 也是地表能量平衡和水平衡的重要组成部分。有效估算地表蒸散, 一直是农学、水文学、气象学、土壤学等学科的重要研究内容, 在区域农业生产、水资源规划管理、干旱监测等方面具有重要意义^[1]。卫星遥感技术的出现, 为大尺度非均匀地表蒸散反演提供了新途径。首先, 遥感能够提供大范围地表特征信息, 使得将蒸散模型应用到更大区域成为可能; 其次, 遥感可以定量反演能量和水分平衡中的地表参数如地表净辐射、地表温度等, 因此利用遥感获取区域尺度蒸散量能得到更准确的结果^[2-3]。

业务化应用是遥感技术为相关部门提供决策支持, 发挥实用的关键。很多遥感应用如地表温度反演、农作物估产、冰雪灾害监测、海洋环境污染监测等都已进入业务化运行阶段^[4-7]。而基于遥感数据的地表蒸散反演大多仍停留在试验研究阶段。随着精准农业、水资源管理、灾害监测等领域的应用进一步加深, 对作为反映作物生长状况及地区能量和水量平衡重要指标的地表蒸散进行业务化反演便成为应用时的迫切所需。如“环境与灾害监测预报小卫星星座”发射后, 需要建立业务化运行的地表特征参数反演系统, 其中就包括对地表蒸散的反演。

本研究重点在于选取适合业务化运行的反演模型, 建立一种反演区域地表蒸散的业务化技术流程, 为地表蒸散业务化反演提供一种思路方法。并在 MODIS 产品数

据的支持下进行了实际运作, 反演得到瞬时地表蒸散及日蒸散量, 最后对反演结果进行精度评价, 验证所选模型和所建立技术流程的可行性。

1 业务化反演模型的选取及技术流程的建立

1.1 目标及原则

目前基于遥感的地表蒸散业务化反演的困难主要在于: 1) 反演模型的适用性。基于遥感的蒸散模型多种多样, 复杂程度各有不同, 需选取一种既能满足精度需求, 又能推广应用的模型以满足业务化运行需求。2) 模型参数较难获取。许多模型所需输入参数如空气动力阻抗、植被冠层阻抗等无法直接从遥感数据或气象数据获得, 只能由实测而得, 大大增加了业务化操作的难度。3) 气象数据插值导致误差累计。除经验回归方法外, 各种地表蒸散反演模型都需气象数据作辅助, 气象数据是点数据, 进行区域蒸散反演时需插值到面, 由于下垫面几何结构及物理性质的水平非均匀性, 众多气象数据插值将导致误差累积, 因而无法准确估算特定区域的地表蒸散量^[2-3, 8]。4) 缺乏明确的技术体系。现今地表蒸散遥感反演多以试验、研究为目的, 往往是针对某一特定区域建立操作流程, 无法满足需推广应用的业务化运行需求。

因此, 在满足合理精度的前提下, 需寻求一种能够满足业务化运行需求的反演模型并建立相应技术流程。概括地说, 选取模型方法和建立流程的目标和原则主要为^[9]: 1) 独立性。所选模型需尽可能少的气象数据作为辅助参数, 应使用常用的较易获取的气象数据作为输入, 尽量降低气象数据在整个估算过程中的影响。2) 简洁性。整个技术流程有明确的输入输出, 保证业务化运行的流畅, 并能节省计算资源。3) 普适性。选用的模型和建立的技术流程应能适用于各种地表覆盖类型的异质地表, 能适用于各种气候条件, 各个时节的地表蒸散反演。4) 尺度扩展。反演结果不仅能得到卫星过境时刻的瞬时

收稿日期: 2009-03-25 修订日期: 2009-05-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB714406); 国家科技支撑计划(2008BAC34B03); 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目专项项目资助; 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室资助项目; 欧盟项目 CEOP-AEGIS (FP7-ENV-2007-1 Grant nr. 212921)

作者简介: 周川(1985—), 男, 四川广元人, 研究方向为遥感、地理信息系统。北京 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 100101。Email: zhouchuan15@gmail.com

地表蒸散量,也能进行时间尺度扩展,得到每日蒸散量,这也是更常用的一个结果。

1.2 业务化反演模型的选取

基于遥感技术的地表蒸散反演模型可分为3大类:1)物理机理模型,如Penman-Monteith (PM)模型^[10]。PM模型基于单层模型(大叶模型)假设,综合了能量平衡法与空气动力学法,精度较高,被学术界广泛运用。但它涉及较多难以精确测定或估算的非遥感参数如冠层阻抗、空气动力学阻抗等,且需气温、气压、风速、相对湿度等较多气象数据作为输入,仅仅适用于稠密植被状态下的局地地表蒸散计算^[11-12];2)经验模型,如Hargreaves方程^[13]。由经验回归而得,只需地表最高、最低温度和入射太阳辐射作为输入,方法简单所需输入参数少,仅适用于特定区域地表蒸散估算,普适性差;3)半机理一半经验模型,如Priestley-Taylor (PT)模型^[14],该模型是由Priestley提出的直接计算潜热通量的方法,既考虑了地表能量收支平衡(辐射项),又考虑了表层大气动力学过程(空气动力项)^[11],该模型由于将PM模型中最难计算的空气动力项用经验系数代替,大大减小了模型的复杂度和所需输入参数的数量,因而仅需较少的辅助数据需求,在应用研究中被广泛采用。

除Hargreaves方法完全独立于气象数据外,其他反演模型或方法均在不同程度上依赖气象数据辅助。某些

气象数据较难获取及插值所导致的误差累积决定了选用于地表蒸散业务化反演的模型应尽可能少地以气象数据作输入。且遥感方法能够得到的地表参数有限,一些复杂、繁琐的模型的应用必然受到很大限制,而那些简便、高效的模型则可以用遥感数据直接驱动,因而便于推广和应用^[12]。显然,与需要较多气象数据作输入的PM模型和普适性较差的Hargreaves模型相比,基于较少气象辅助数据需求的PT模型是既不失物理机理,又具有较好普适性的反演模型。其优点在于摆脱了湿度、风速、地表粗糙度、植被冠层阻抗等非遥感参数的束缚,尽量避开了具有极大不确定性的空间插值问题,因此更具灵活性和可操作性。基于以上分析,本研究选用PT模型作为地表蒸散业务化反演的核心算法。

PT模型的核心公式为

$$LE = \phi \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (1)$$

式中: LE ——潜热通量, W/m^2 ; ϕ ——PT系数; Δ ——饱和水汽压斜率, $kPa/^\circ C$ (空气温度为 T_a 时, T_a ——平均气温, K); γ ——干湿表常数, $kPa/^\circ C$; R_n ——地表净辐射通量, W/m^2 ; G ——土壤热通量, W/m^2 。

1.3 业务化反演技术流程

基于以上目标和原则,选用PT模型为核心方法,建立反演地表蒸散业务化运作技术流程,如图1。

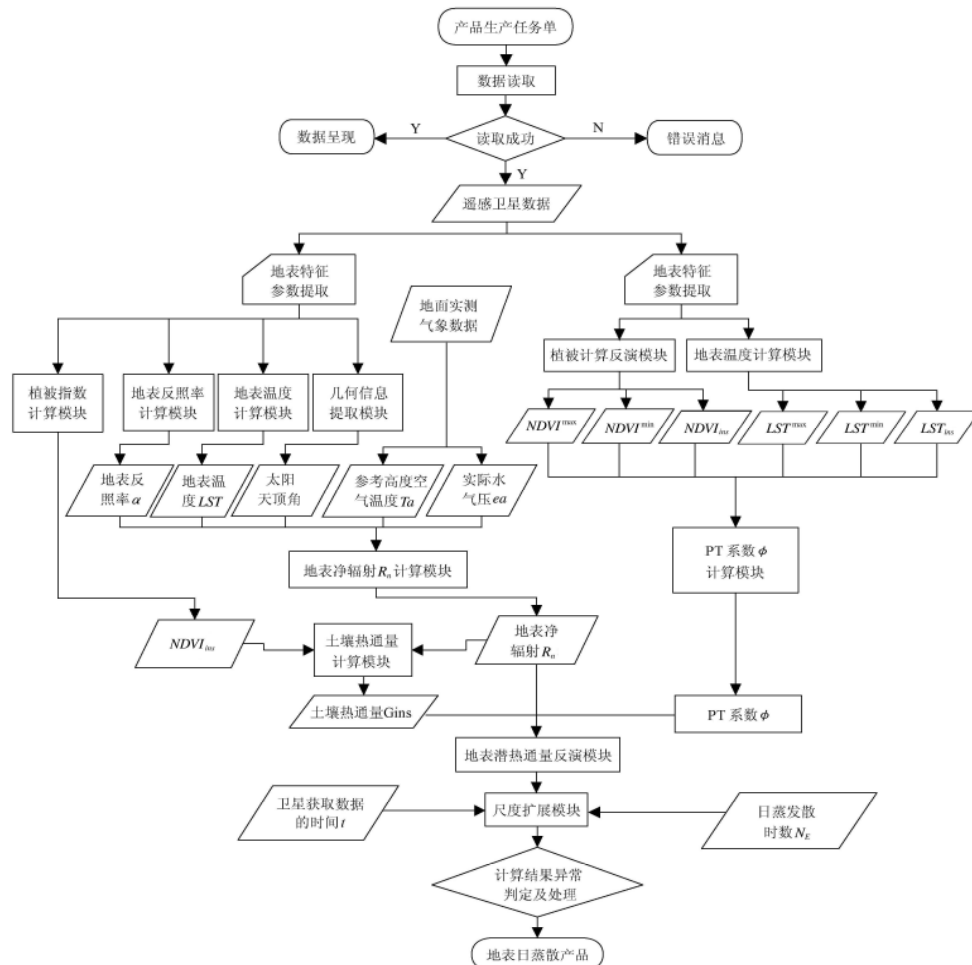


图1 地表蒸散量业务化反演技术流程

Fig.1 Operational retrieving technique flow chart for surface evapotranspiration

2 实例验证

本研究以黑河流域为试验区作实例应用,以验证评价所选反演模型和技术流程的可行性。

2.1 黑河流域自然概况

黑河是中国西北地区第二大内陆河,流域范围介于东经 $97^{\circ}24' \sim 102^{\circ}0'$,北纬 $37^{\circ}50' \sim 42^{\circ}40'$ 之间,流域面积约 14.29 万 km^2 。黑河从发源地祁连山北麓到居延海全长 821 km ,以鹰落峡、正义峡为界分上、中、下游,横跨 3 种不同自然环境单元。流域气候受中高纬度西风带环流控制和极地冷气团影响,气候干燥,降水稀少而集中,日照充足。土壤类型有寒漠土、草甸土、灰钙土、栗钙土等。上游祁连山区主要植被类型有灌丛和高山森林、高山草原草甸、荒漠草原等。中下游地带性植被为温带小灌木、半灌木荒漠。中游山前冲积扇下部和河流冲积平原上分布灌溉绿洲栽培农作物和林木,呈现以人工植被为主的绿洲景观,是中国著名的产粮基地。下游河流两岸及冲积三角洲里,生长有荒漠河岸林、灌木林和草甸等荒漠植被,流域北部为沙漠戈壁,气候干燥,风沙危害严重^[15]。黑河流域植被覆盖图见图 2。

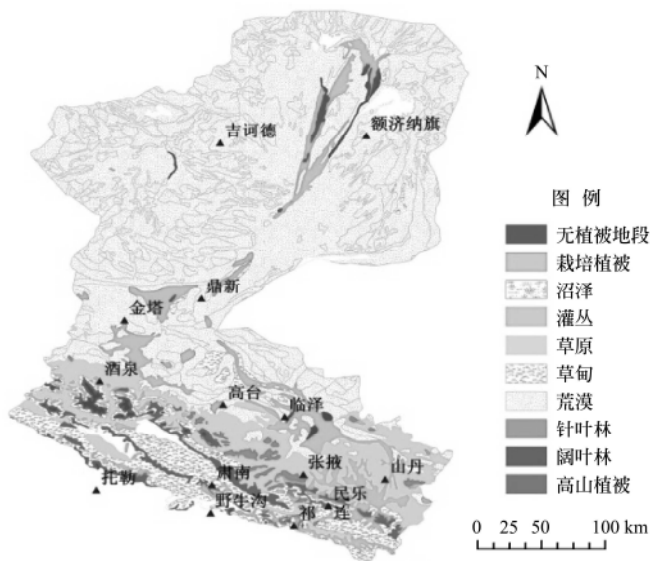


图 2 黑河流域植被覆盖图

Fig.2 Vegetation cover map of Heihe river basin

2.2 数据来源及处理

研究选取 2006 年 6 月 9 日数据进行地表蒸散反演,此时处夏季植被生长旺盛期,植被覆盖度较高,降雨量比较充分,地表蒸散量相对其他月份较大。当天研究区上空云量极少,地表反照率,地表温度等遥感数据更加准确,能够得到更加真实的反演结果。

研究区基础地理数据来自中国西部环境与生态科学数据中心,包括黑河流域 1:10 万行政边界矢量图、1:100 万植被数据集。主要用于制图和裁剪遥感影像数据。

所需遥感数据由 MODIS 产品获取。数据处理包括投影转换、研究区范围裁剪、坏值去除、重采样,空间配准,相应参数提取等。

所用气象数据来自中国气象数据共享网。选用黑河流域内及周围共 22 个气象站点的观测数据,气象站点均匀覆盖整个流域范围,且数量较多。主要处理包括添加投影信息,数值插值、与遥感影像空间配准。研究选用气象观测站分布图见图 3。

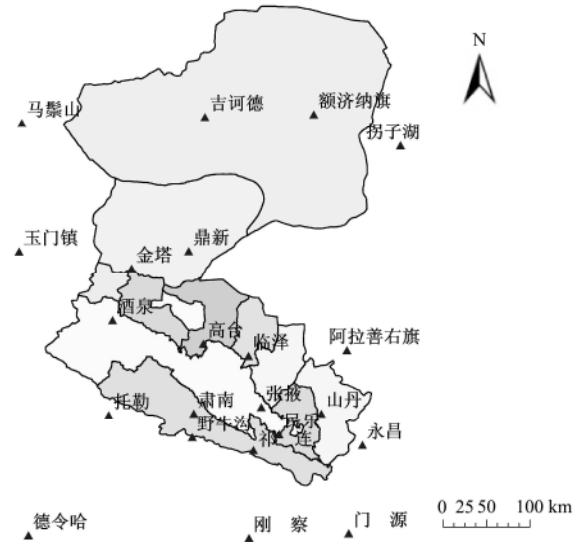


图 3 黑河流域气象站点分布图

Fig.3 Distribution map of meteorological station in Heihe river basin

2.3 PT 模型参数获取

基于业务化运行的考虑,对 PT 模型中各项参数的计算,应尽量避免增加对辅助数据的需求,特别是某些难以直接从遥感或气象数据获得的数据,同时应避免增加模型参数计算的复杂度。由于各个参数计算算法并不唯一,如地表净辐射 R_n 中下行短波辐射的计算及日蒸散量计算中日蒸散时数的计算等,因此本文选取仅需遥感数据提供输入参数的算法,降低了对辅助数据的需求及技术流程的复杂度,有助于业务化运行的实现。

2.3.1 地表净辐射 R_n

地表净辐射指地表辐射能量收支的差额。它是地表能量、动量、水分输送与交换过程的主要能源^[11]。地表净辐射方程

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

等式右边第一项为地表短波辐射平衡。第二项为来自大气的长波辐射,即大气逆辐射。第三项为地表发射至大气的长波辐射,即地表发射辐射。后两项之差为地表长波辐射平衡。 Q 为下行短波辐射,通常需用到参数大气透过率 τ 计算, τ 由大气辐射传输模型MODTRAN4模拟得。但为尽量减少其他辅助数据需求,且考虑到技术流程的简洁性和易实现性,采用如下算法计算^[16]

$$Q = S_0 \cos(\theta) E \quad (3)$$

式中: S_0 ——太阳常数, W/m^2 ,在此取值 1366.67 ; θ ——太阳天顶角, $^{\circ}$; E ——修正系数,计算公式为

$$E = 1.00011 + 0.034221 \cos(d_a) + 0.00128 \sin(d_a) + 0.000719 \cos(2d_a) + 0.000077 \sin(2d_a) \quad (4)$$

$$d_a = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365} \quad (5)$$

式中: d_n ——儒略日, 在此例中 $d_n=160$; α ——地表反照率, 由MODIS二向反射率和地表反照率产品MCD43B1计算而得; ε_a ——空气比辐射率, 计算公式为

$$\varepsilon_a = 1.24(e_a / T_a)^{1/7} \quad (6)$$

式中: e_a ——实际水汽压, hPa (空气温度为 T_a 时); ε_s ——地表比辐射率; T_s ——地表温度, K, 由MODIS地表温度和比辐射率产品MOD11A1计算而得; σ ——Stefan-Boltzmann 常数。

2.3.2 土壤热通量 G

土壤热通量 G 采用 Bastiaanssen^[17] 所提出公式计算

$$G = \frac{R_n T_s (0.0032\alpha + 0.0062\alpha^2)(1 - 0.978NDVI^4)}{\alpha} \quad (7)$$

流域北部地区为大面积荒漠覆盖, $NDVI$ 值很低。对于 $0 < NDVI < 0.15$ 的裸地其土壤热通量取值为地表净辐射的20%, 即

$$G = 0.2R_n \quad (8)$$

式中 $NDVI$ ——归一化植被指数, 由MODIS植被指数产品MOD13A1得。

2.3.3 Priestley-Taylor系数 ϕ

PT系数 ϕ 根据 Le Jiang, Shafiqul Islam^[18-19]; G. Nourbaeva, S. Kazama^[20] 提出的采用 $NDVI$ 和地表温度 LST 确定的算法可得

$$\phi = \frac{(\Delta + \gamma)}{\Delta} \left[\left(\frac{NDVI_i^{\max} - NDVI_i^{\min}}{NDVI_i^{\max}} \right) \times \left(\frac{LST_i^{\max} - LST_i^{\min}}{LST_i^{\max} - LST_i^{\min}} \right) + \left(\frac{NDVI_i^{\min}}{NDVI_i^{\max}} \right) \right] \quad (9)$$

式中: LST ——当前像元的地表温度值, K; 该方法将整幅图像根据 $NDVI$ 值大小分为水体、植被、荒漠等类型, $NDVI_i^{\max}$ 、 $NDVI_i^{\min}$ 、 LST_i^{\max} 、 LST_i^{\min} 分别表示在每一种 $NDVI$ 类型中当前像元所对应的 $NDVI$ 和 LST 的最大值和最小值; $NDVI_{\max}$ ——整个研究区内的 $NDVI$ 最大值。

3 结果与分析

3.1 瞬时蒸散量

基于上述算法流程和数据, 反演得到2006年6月9日黑河流域卫星过境时刻瞬时潜热通量 $LE_{ins \tan t}$ 。瞬时潜热通量 $LE_{ins \tan t}$ 与瞬时蒸散量 $ET_{ins \tan t}$ 的关系^[21]为

$$ET_{ins \tan t} = 3600(LE_{ins \tan t} / \lambda) \quad (10)$$

式中 λ ——蒸发潜热, $W \cdot m^2 \cdot mm^{-1}$, 在此取值 2.49×10^6 。至此, 反演得到黑河流域卫星过境时刻瞬时蒸散量, 反演结果如图4。

由图4可见, 在流域内不同地表覆盖条件下, 地表蒸散量有明显差异, 以植被覆盖条件最好的南部高山森林和草甸地区蒸散量最大, 达到了 0.7 mm 以上, 其次是中上游人工作物覆盖区, 以及下游河流两岸及冲积三角

洲里的荒漠植被覆盖区, 蒸散量介于 $0.2 \sim 0.7 \text{ mm}$, 一些水体覆盖区域蒸散量也比较大, 大约在 $0.4 \sim 0.5 \text{ mm}$ 左右, 中下游荒漠和沙漠地带地表蒸散量最小, 接近 0 。从整体上看区域差异比较明显, 与实际情况相符^[8]。

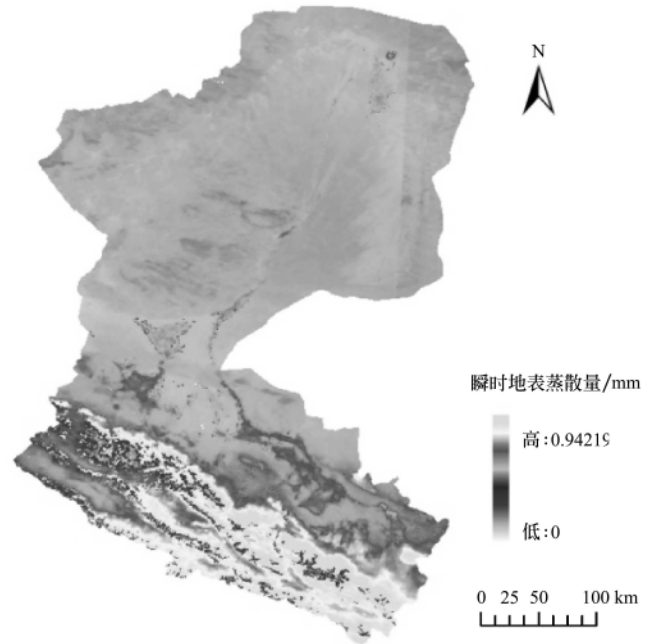


图4 2006年6月9日黑河流域卫星过境时刻瞬时蒸散量

Fig.4 Instantaneous evapotranspiration map of Heihe river basin at the satellite passing-by time in 2006-06-09

3.2 日蒸散量

以上反演得到瞬时地表蒸散 $ET_{ins \tan t}$, 但实际应用中主要采用日蒸散量 ET_{day} , 因此需对其作时间尺度扩展。据研究表明, 日蒸散量与任一时刻的蒸散量存在正弦关系^[22], 即

$$\frac{ET_{day}}{ET_{ins \tan t}} = \frac{2N_E}{\pi \times \sin(\pi / N_E)} \quad (11)$$

式中: t ——卫星数据获取的时间, h (从日出算起至 $ET_{ins \tan t}$ 时刻的时间间隔); N_E ——日蒸散时数。一般来说 N_E 可从实测数据或气象数据获得, 但基于业务化反演应尽量减少对这些辅助数据的需求, 在此采用 Jackson 等人提出的算法计算^[23]

$$N_E = a + b \sin 2[\pi(d_n + 10) / 365] \quad (12)$$

$$a = 12 - 5.69 \times 10^{-2} L - 2.02 \times 10^{-2} L^2 - 2.02 \times 10^{-4} L^3 + 8.25 \times 10^{-6} L^4;$$

$$b = 10.123 L - 3.10 \times 10^{-4} L^2 - 8.00 \times 10^{-7} L^3 + 4.99 \times 10^{-7} L^4$$

式中 L ——地理纬度。反演得到黑河流域日蒸散量, 如图5。

3.3 结果验证与精度评价

由于缺乏相应的地表蒸散同步实测数据, 在此以国际粮农组织 FAO 推荐的 FAO 56 Penman-Monteith 公式为验证模型依据, 该模型是 FAO 推荐的计算参考作物蒸散量的标准方法, 全面考虑了影响田间水分散失的大气因素和作物因素, 把能量平衡、空气动力学参数和表面参数结合在一起, 可应用于世界各个地区, 估值精度较高,

具有良好的可比性^[24-26]。公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (13)$$

式中: ET_0 ——参考作物蒸散量, mm/d; T ——日平均气温, $^{\circ}\text{C}$; u_2 ——2 m 高处平均风速, m/s; e_s , e_a ——饱和水气压和实际水气压, kPa。

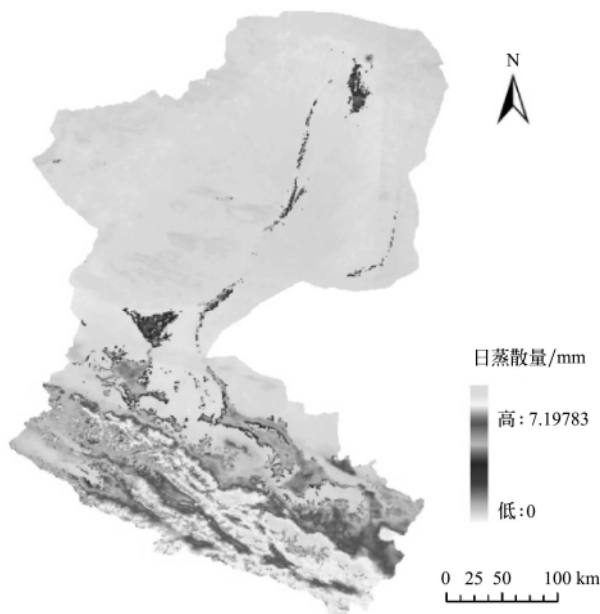


图5 2006年6月9日黑河流域日蒸散量

Fig.5 Daily evapotranspiration of Heihe river basin in 2006-06-09

由于 FAO 56 Penman-Monteith 公式用于计算参考作物蒸散, 其应用区域是具有良好植被覆盖的下垫面类型, 因此在对本研究所选 PT 模型计算结果进行精度验证时须选取植被覆盖度较高地区进行。根据该流域 NDVI 数据以及植被覆盖数据图, 随机选取 180 个样本点 (包括 4 个气象站: 酒泉、高台、张掖、山丹) 数据进行精度验证和评价, 样点包含了高山森林、高山草原草甸、灌木、农田作物、栽培林木等植被类型。检验结果见图 6。

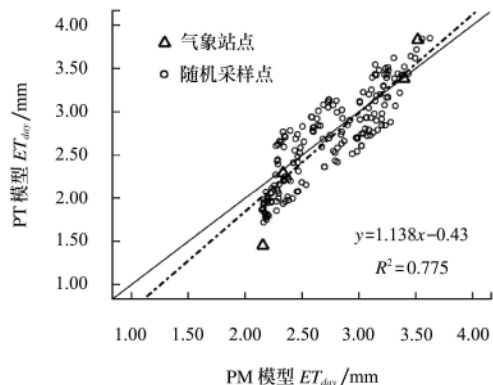


图6 利用 PM 模型对 PT 模型地表日蒸散量反演结果精度检验

Fig.6 Accuracy verification for retrieved daily ET with PT model result by PM model

结果表明, 利用 PT 模型反演而得的地表日蒸散量与

作为检验标准的 PM 模型的反演结果具有良好的相关性 ($R^2 = 0.775$, 相关系数达到 0.880)。

可见, 反演结果具有较高的精度, 该模型的选用和反演技术流程的建立是成功的, 在实际操作上能够满足业务化反演的需求。

4 结 论

1) 遥感反演地表蒸散不能只停留在试验、研究阶段, 而要提高应用水平, 服务于地区灾害监测或资源管理, 提供实时监测信息, 最终为生产管理提供决策支持。地表蒸散遥感业务化反演所面临的困难要求寻求一种合适的地表蒸散反演模型, 建立相应业务化运行技术流程, 满足地表蒸散业务化反演需求。

2) 本文研究得出, PT 模型的选用和相应技术流程的建立是合理的, 在较少的气象数据辅助的前提下能够满足反演精度要求, 达到了建立业务化反演流程所设定的原则和目标, 对今后地表蒸散业务化反演运作或反演系统设计有较好的参考和借鉴作用。

3) 在今后的应用中需要对该模型和反演流程在不同气候条件、不同季节、不同植被覆盖条件下的应用潜力和效果作进一步试验验证, 以对各项参数确定和业务流程加以改进和完善, 最终开发相应软件系统 and 应用平台, 投入业务化试验运行。本研究在精度验证时由于缺少实测数据, 只能以另一种标准模型作补充验证, 今后有必要获取地面实测数据进行验证, 以得到更加客观准确的检验评价。

【参 考 文 献】

- [1] 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—6. Yang Yongmin, Feng Zhaodong, Zhou Jian. Evapotranspiration in Heihe River Basin based on SEBS model[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2008, 44(5): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [2] 鲍平勇. 半干旱区域日蒸散发估算遥感研究[D]. 南京: 河海大学, 2007: 1—3. Bao Pingyong. Estimation of the Day Evapotranspiration in Semiarid Area Using Remote Sensing[D]. Nanjing: Hohai University, 2007: 1—3. (in Chinese with English abstract)
- [3] 郭晓寅, 程国栋. 遥感技术应用于地表面蒸散发的研究进展[J]. 地球科学进展, 2004, 2(1): 107—114. Guo Xiaoyin, Cheng Guodong. Advances in the application of remote sensing to evapotranspiration research[J]. Advance In Earth Sciences, 2004, 2(1): 107—114. (in Chinese with English abstract)
- [4] 杨虎, 杨忠东. 中国陆地区域陆表温度业务化遥感反演算法及产品运行系统[J]. 遥感学报, 2006, 10(4): 600—607. Yang Hu, Yang Zhongdong. A modified land surface temperature split window retrieval algorithm and its applications over China[J]. Journal Of Remote Sensing, 2006, 10(4): 600—607. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘扬, 周清波, 刘佳, 等. 基于遥感和 WebGIS 的冬小麦估产支持系统[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3371—

- 3375.
- Liu Yang, Zhou Qingbo, Liu Jia, et al. Study on remote sensing and WebGIS-based winter wheat yield estimating supporting system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10): 3371—3375. (in Chinese with English abstract)
- [6] 边多, 董妍, 边巴次仁, 等. 基于MODIS资料的西藏遥感积雪监测业务化方法[J]. *气象科技*, 2008, 36(3): 345—348.
- Bianduo, Dong Yan, Bianbaciren, et al. Practical method for monitoring snow in tibet plateau based on MODIS data[J]. *Meteorological Science And Technology*, 2008, 36(3): 345—348. (in Chinese with English abstract)
- [7] 赵冬至. 海洋环境污染与灾害卫星遥感业务化监测系统研究[J]. *遥感信息*, 1999, 2: 22—25.
- [8] 郭晓寅. 黑河流域蒸散发分布的遥感研究[J]. *自然科学进展*. 2005, 15(10): 1266—1270.
- [9] Kenlo N, Ramakrishna R N, Steven W. Running, et al. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(9): 5-1—5-14.
- [10] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irr. & Drain. 1998, Paper 56. UN-FAO, Rome, Italy.
- [11] 赵英时, 等. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 104—130, 435—439.
- [12] 田国良. 热红外遥感[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 242—243.
- [13] Hargreaves G H, Samani Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. *Applied Engng in Agric*, 1985, 1: 96—99.
- [14] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. *Mon. Weather Rev*, 1972, 100: 81—82.
- [15] 蒙吉军, 吴秀芹, 李正国. 黑河流域 1988-2000 年土地利用覆被变化研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2004, 40(6): 229—239.
- Meng Jijun, Wu Xiuqin, Li Zhengguo. Land use and land cover changes in heihe river basin during the period of 1988-2000[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2004, 40(6): 229—239. (in Chinese with English abstract)
- [16] Willem W. Verstraeten, Frank Veroustraete, Jan Feyen. Estimating evapotranspiration of European forests from NOAA-imagery at satellite overpass time: Towards an operational processing chain for integrated optical and thermal sensor data products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96: 256—276.
- [17] Bastiaanssen W G M. Remote Sensing in Water Resources Management: The State of the Art (Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute), 1998.
- [18] Le Jiang, Shafiqul Islam. Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data[J]. *Water Resour Res*, 2001, 37(2): 329—340.
- [19] Le Jiang, Shafiqul Islam. A methodology for estimation of surface evaporation over large areas using remote sensing observations[J]. *Geophys Res Lett*, 1999, 26(17): 2773—2776.
- [20] Nourbaeva G, Kazama S, Sawamoto M. Assessment of daily evapotranspiration using remote sensing data[J]. *Environmental Informatics Archives*, 2003, 1, 421—427.
- [21] 查书平. 基于 RS 与 GIS 的长江三角洲蒸散量研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2004: 39—40.
- Zha Shuping. The Research of Evapotranspiration in Yangtze Delta Based on RS and GIS[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2004: 39—40. (in Chinese with English abstract)
- [22] 谢贤群. 遥感瞬时作物表面温度估算农田全日蒸发散总量[J]. *环境遥感*, 1991, 6(4): 253—259.
- Xie Xianqun. Estimation of daily evapotranspiration(ET) from one time-of-day remotely sensed canopy temperature[J]. *Remote Sensing of Environment China*, 1991, 6(4): 253—259. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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: 30—32.
- Jiang Hong. Research of Evapotranspiration in Qitai County, Xinjiang Based on MODIS Data[D]. Urumchi: Xinjiang University, 2007: 30—32. (in Chinese with English abstract)
- [24] 吴锦奎, 丁永建, 沈永平, 等. 黑河中游地区湿草地蒸散量试验研究[J]. *冰川冻土*, 2005, (4): 582—890.
- Wu Jinkui, Ding Yongjian, Shen Yongping, et al. Experimental study on evapotranspiration of swampy meadow in the middle reach of Heihe River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, (4): 582—890. (in Chinese with English abstract)
- [25] 赵炳祥, 陈佐忠, 胡林, 等. 草坪蒸散研究进展[J]. *生态学报*, 2003, 23(1): 148—157.
- Zhao Bingxiang, Chen Zuozhong, Hu Lin, et al. Turfgrass Evapotranspiration: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 148—157. (in Chinese with English abstract)
- [26] 刘晓英, 林而达, 刘培军. Priestley-Taylor 与 Penman 方法计算参照作物腾发量的结果比较[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(1): 32—36.
- Liu Xiaoying, Lin Erda, Liu Peijun. Comparative study on priestley-taylor and penman methods in calculating reference crop evapotranspiration[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(1): 32—36. (in Chinese with English abstract)

Operational retrieving of land surface evapotranspiration based on remote sensing technology

Zhou Chuan^{1,2}, Niu Zheng¹

(1. *The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: The current situation of urgent requirement and obstacles in retrieving land surface evapotranspiration (ET) operationally were analyzed. By the comparison of the most commonly and widely used models for ET estimation, taking into account for the principles of independence, simplicity, versatility, scalability for operational retrieving, and selecting the Priestley-Taylor (PT) model as the key algorithm, an operational technical flow-scheme was established to obtain the daily ET. With the support of MODIS data and meteorological data, taking Heihe river basin as experiment area, the model and flow-scheme were verified, and daily ET were retrieved. Evaluation of the relative accuracy of operational ET estimation flow-scheme was made by using FAO56 Penman-Monteith model supposed to be the standard model. High correlation coefficients of 0.880 were observed by these two models. Results with relatively high accuracy proved that the PT model and the flow-scheme were workable, and sufficient to satisfy the requirement of operational processing, and it was worthwhile to utilize them for the future operational ET retrieving.

Key words: land surface evapotranspiration, remote sensing, priestley-taylor model, Penman-Monteith model, operational, Heihe River basin