

李星敏, 卢玲, 李新, 等. 黑河流域日蒸散发遥感估算研究[J]. 高原气象, 2010, 29(1): 109 - 114

# 黑河流域日蒸散发遥感估算研究

李星敏<sup>1-2</sup>, 卢玲<sup>1</sup>, 李新<sup>1</sup>, 杨文峰<sup>3</sup>,  
黄春林<sup>1</sup>, 王钊<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 陕西省气象科学研究所, 陕西 西安 710015;  
3. 陕西省气象台, 陕西 西安 710015; 4. 陕西省农业遥感信息中心, 陕西 西安 710015)

**摘 要:** 地表蒸散的估算在干旱半干旱区水资源研究中具有重要意义。利用 NOAA/AVHRR 遥感资料、NCEP 再分析格点资料和气象站点资料, 根据能量平衡模型和 FAO-17 Penman 公式, 计算了研究区域内逐日蒸散发量; 对于晴天, 用遥感模型反演出瞬时蒸散, 进而推算出日蒸散; 同时用 FAO-17 Penman 公式和气象资料, 计算研究区域内的同一天的蒸散, 利用气象资料计算得到的蒸散与遥感估算的蒸散的关系, 估算非晴空日的蒸散, 进而得到逐日蒸散发结果。与同类研究结果比较表明: 该方法能够估算逐日蒸散发, 通过气象与遥感资料结合, 提高了气象格点资料的空间分辨率, 弥补了难以得到遥感逐日晴空资料的不足, 同时也为流域内同类研究提供参考依据。

**关键词:** 黑河流域; 遥感; 蒸散发

**文章编号:** 1000-0534(2010)01-0109-06 **中图分类号:** P414.8 **文献标识码:** A

## 1 引言

地表蒸发量是认识和研究地气相互作用中水分平衡过程和能量平衡过程的重要因子。自 1802 年 Dalton 提出计算蒸散的公式以来, 随着观测技术和对大气边界层认识的提高, 水文学家和气象学家提出了一系列从经验半经验公式到物理模型的计算蒸发和蒸散的方法<sup>[1-3]</sup>, 这些方法由于下垫面的非均一性, 在大面积推广使用时, 一般很难取得较准确的结果。近年来随着遥感技术的发展, 多时相、多光谱的遥感资料能够综合反演出下垫面的几何结构和植被覆盖状况, 再加上遥感特有的高空间分辨率特点, 使得遥感方法在区域蒸散的计算方面具有明显的优越性。

利用遥感技术计算蒸散目前已有多种方法, 研究较多的是 Priestley - Talor 模型<sup>[4]</sup>和 SEBAL 模型<sup>[5]</sup>。Priestley - Talor 模型简便易行, 在国内外已引起很多学者的关注。SEBAL 模型是由荷兰 Water - Watch 公司 Bastiaanssen 开发的基于遥感的陆面能量平衡模型, 自应用以来已被作为利用遥

感计算蒸散的重要方法, 在欧美和亚非拉等一些国家得到应用。2002 年 Su<sup>[6]</sup>提出了能量平衡系统模型(SEBS), 利用地表能量平衡指数获得相对蒸发和蒸发比, 进而得到潜热通量<sup>[7]</sup>。

国内利用遥感研究蒸散发虽然起步较晚, 但近年来已做了大量工作, 特别是在研建适用于农田系统和非均匀性地表的区域遥感蒸散发模型方面取得了长足进展, 陈镜明<sup>[8]</sup>提出了剩余阻抗的概念, 陈云浩等<sup>[9]</sup>利用这一概念对西北地区的蒸散发进行了计算。谢贤群<sup>[10]</sup>认为日蒸散发量与任意时刻的蒸散量存在正弦曲线关系, 这一研究成果使得由遥感估算的瞬时蒸散推算到了日蒸散。20 世纪 90 年代初, 中日合作在黑河地区开展了地—气相互作用实验研究<sup>[11]</sup>, 开始了遥感的地表参数反演研究<sup>[12-13]</sup>和地表能量通量研究, 马耀明等<sup>[14-15]</sup>利用 LANDSAT-TM 资料进行了非均匀陆面上区域能量通量的参数化方案, 并利用黑河试验(HEIFE)的观测资料进行验证, 取得了较好的结果; 郭晓寅<sup>[16]</sup>利用 NOAA-AVHRR 资料, 选取 Priestley - Taylor 公式, 提出了用植被指数、地表温度和气温确定其中

收稿日期: 2008-10-12; 改回日期: 2009-10-14

基金项目: 国家自然科学基金“陆地碳循环遥感与模型模拟的融合方法研究”(40871190); “基于数据同化方法的蒸散发遥感估算及时间尺度扩展研究”(40801126)共同资助

作者简介: 李星敏(1968—), 女, 甘肃酒泉人, 硕士, 主要从事遥感与应用气象业务与研究。E-mail: lixingmin803@163.com

参数的方法,对黑河流域典型地表参数和蒸散发的时空分布进行了反演和验证。张万昌等<sup>[17]</sup>采用陆表能量平衡算法(SEBAL),从TM影像上反演出地表能量通量各分量的空间分布,从而得到黑河流域蒸散发。此外,一些研究人员利用参考作物蒸散对黑河流域农田的辐射收支进行了研究<sup>[18]</sup>。在国内其它地方,乔平林<sup>[19]</sup>利用MODIS资料估算了石羊河流域的蒸散发;郭玉川等<sup>[20]</sup>利用Landsat ETM+资料估算了西北内陆区地表蒸散发;潘志强等<sup>[21]</sup>研究了黄河三角洲的遥感蒸散;刘蓉等<sup>[22]</sup>利用MERIS和AATSR资料估算了黄土高原塬区的蒸散发量。潘卫华等<sup>[23]</sup>利用TM资料对福建泉州市的蒸散发量进行了反演。这些反演利用不同的遥感资料对遥感蒸散发模型在不同下垫面的应用做了研究,估算出了晴天的蒸散发,但当遇到阴天无法获得遥感资料时,不能连续获取蒸散发。另外,蒸散发还会随作物生长变化而变化。

本研究以黑河流域为研究区域,黑河流域位于西北地区内陆,气候干燥,降水稀少而集中,且多大风,日照充足,昼夜温差大<sup>[24]</sup>。黑河源头的祁连山区植被属温带山地森林草原,中游、下游主要是温带小灌木、半灌木荒漠植被。区域内自然分异显著,山区、平原绿洲区和荒漠区具有截然不同的自然景观特征<sup>[16]</sup>。利用遥感资料、气象观测资料和NCEP再分析资料,通过遥感反演模型和Penman方法估算区域内逐日蒸散,对研究区域内水分平衡、水资源管理和水分利用效率的研究具有重要意义。

## 2 模型与数据

按照能量平衡系统模型框架,应用对遥感数据处理所获得的一系列地表物理参数如反照率、比辐射率、温度、植被覆盖度等,结合地面同时次观测的气象资料,反演出区域内晴空遥感蒸散发量;采用Penman公式,计算研究区域内的参考作物蒸散,利用该蒸散与遥感估算的晴空蒸散的关系,估算晴天前后几日内非晴空的日蒸散,进而得到逐日蒸散发结果。

### 2.1 遥感蒸散发反演模型

由近地面能量平衡方程<sup>[25]</sup>:

$$E = R_n - G_0 - H, \quad (1)$$

式中, $R_n$ 为地表净辐射通量, $G_0$ 为土壤热通量, $H$ 为显热通量, $E$ 为潜热通量。模型中各参数的确

定如下:

#### (1) 地表净辐射通量<sup>[25]</sup>

$$R_n = (1 - \rho_0) K \downarrow + \rho_0 \cdot L \downarrow - \rho_0 \cdot \epsilon \cdot LS T_0^4, \quad (2)$$

式中, $\rho_0$ 是地表反照率, $K \downarrow$ 为向下的短波辐射, $L \downarrow$ 为向下的长波辐射, $\rho_0$ 为地表发射率, $\epsilon$ 为斯蒂芬-波耳兹曼常数, $LS T_0$ 为地表温度。

其中向下的短波辐射为

$$K \downarrow = I_0 \cdot E \cdot \cos \theta, \quad (3)$$

式中, $I_0$ 为瞬时地球大气外太阳辐射, $E$ 为日地距离变化而产生的偏心率系数, $\theta$ 为太阳天顶角, $\tau$ 为大气透过系数,计算采用<sup>[26]</sup>下式:

$$\tau = \exp(-B \sec z (p/p_0)), \quad (4)$$

式中, $z$ 为太阳天顶角, $p$ 为观测点气压, $p_0$ 为海平面气压, $B$ 为与季节有关的系数。

大气向下的长波辐射 $L \downarrow$ 由灰体辐射公式计算:

$$L \downarrow = \epsilon_a T_a^4, \quad (5)$$

式中, $T_a$ 为大气温度, $\epsilon_a$ 为发射率;以上计算中使用涉及到的气压 $p$ 和气温资料 $T_a$ 取自进行降尺度分析后的NCEP再分析资料。

地表温度( $LS T_0$ )的反演经与地面气象站测得的地表温度比较,选用了Ulivieri等<sup>[27]</sup>的算法:

$$LS T_0 = 2.8 \cdot CH4 - 1.8 \cdot CH5 + 48 \cdot (1 - \rho_0) - 75 \cdot \epsilon, \quad (6)$$

式中,CH4、CH5分别为NOAA/AVHRR通道4、5的亮温, $\rho_0$ 、 $\epsilon$ 为地表发射率和4、5通道发射率差。

地表反射率采用Willem等<sup>[28]</sup>的算法:

$$\rho_0 = a \cdot \rho_{ch1} + b \cdot \rho_{ch2} + c, \quad (7)$$

式中, $\rho_0$ 为地表反照率, $\rho_{ch1}$ 、 $\rho_{ch2}$ 分别为NOAA/AVHRR通道1、2的反射率, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为与地面实测点反射率拟合的系数。

#### (2) 土壤热通量

采用郭晓寅等<sup>[16,29]</sup>的算法:

$$G = 0.50 \exp(-2.13MSAVI) R_n, \quad (8)$$

式中,MSAVI为修改型土壤调整植被指数。

#### (3) 蒸散系数

按照SEBAL模型,选择冷点和热点计算显热通量,由于冷点和热点的选择具有经验性,Willem<sup>[28]</sup>的研究认为:在蒸散的日变化过程中,蒸散

系数基本保持不变, 蒸散系数可由下式计算:

$$= \frac{E}{E + H} \frac{LST_H - LST_0}{LST_H - LST_E} = \frac{H \cdot \rho_0 + b_H - LST_0}{(H - E) \rho_0 + (b_H - b_E)}, \quad (9)$$

式中,  $LST_H$  是干像元的地表温度 [K],  $LST_E$  是湿像元的地表面温度 [K],  $LST_0$  是地表面温度 [K],  $\rho_0$  是地表面反照率 [-],  $H$ 、 $E$  分别为干、湿像元地表温度与表面反照率函数的斜率,  $b_H$ 、 $b_E$  分别为干、湿像元地表温度与表面反照率线性函数的截距 [K]。将通过干、湿表面温度与表面反照率的上边界和下边界的拟合线性方程可以计算得到所需要的斜率和截距。

根据求出的蒸散系数、地表净辐射通量  $R_n$ 、土壤热通量  $G_0$ , 就可以计算出研究区域晴空的瞬时蒸散:

$$E = \frac{R_n - G_0}{E + H} = \frac{R_n - G_0}{E + H}. \quad (10)$$

#### (4) 由瞬时蒸散到日蒸散的推算

遥感观测获得的都是瞬时值, 而地表过程无论在时间上还是空间上都是连续的, 因此需要借助于模型, 把瞬时观测“转化”为具有时空一致性的数据。目前由瞬时蒸散到日蒸散的推算主要有两种方法: 一种是在晴朗天气条件下, 农田太阳辐射平衡各分量和农田蒸散的日变化曲线呈正弦变化形式, 对该正弦关系进行积分得到日蒸散<sup>[10]</sup>, 即:

$$LE_d = LE_t \times \frac{2NE}{\sin(t/NE)}, \quad (11)$$

式中,  $LE_d$  为日蒸散量,  $LE_t$  为任一时刻  $t$  的蒸散量,  $t$  为卫星获取数据的时间,  $NE$  为日蒸散时数, 取比日照时数少 2 h。

另一种是利用蒸散系数 EF (Evaporation Fraction) 的概念, Crago<sup>[30]</sup> 的研究认为 EF 在当地时间 09~16 时变化小, 可利用这种稳定性, 从瞬时蒸散推算日蒸散。

本研究使用正弦变化形式, 由瞬时蒸散计算得到晴天的日蒸散。

## 2.2 利用 FAO-17 Penman 修正式结合遥感晴天蒸散求取逐日蒸散

据研究<sup>[31]</sup> 农田实际蒸散受天气因素、土壤湿度和作物生物学特性影响, 可表示为

$$E_a = f_1(S, K_c) \cdot E_0, \quad (12)$$

式中,  $E_a$  为农田实际蒸散量,  $S$  为与土壤水分含量有关的函数,  $K_c$  为作物生物学特征量,  $E_0$  为天气

条件对农田蒸散的影响因子, 就是通常所说的潜在蒸散。本研究中利用遥感获得的晴天日蒸散即实际蒸散, 同时利用降尺度的 NCEP 格点气象资料, 求得晴天的参考作物蒸散, 两者的比值就是与作物生物学特征量和土壤水分含量有关的函数  $f_1(S, K_c)$ 。在几天的时间段内作物生物学特征量和土壤水分含量变化不大, 利用这一思路用晴天遥感资料和格点资料求得的与作物生物学特征量和土壤水分含量有关的参数, 在阴天无遥感资料时, 用这一参数和气象资料求得阴天的日实际蒸散。在每旬内至少选取一个晴天, 用遥感蒸散模型反演实际蒸散, 同时利用 Penman 公式计算同一天的参考作物蒸散, 计算该日实际蒸散与参考作物蒸散的比例系数, 用该系数乘以旬内其它日的参考作物蒸散, 进而得到旬内逐日的实际蒸散。

在对比参考作物蒸散研究的基础上<sup>[32-33]</sup>, 选择使用 FAO-17 Penman 修正式:

$$ET_0 = ET_{rad} + ET_{aero}, \quad (13)$$

$$ET_{rad} = \frac{P_0}{P} \times \frac{R_n}{\rho_0 \times - + 1}, \quad (14)$$

$$ET_{aero} = \frac{0.26(e_0 - e_d)(1 + cU_2)}{P_0 \times -}, \quad (15)$$

$$e_a = 6.11 \times 10^{7.63T/(241.9+T)}, \quad (16)$$

$$= \frac{4249.9}{(241.9 + T)^2} e_a, \quad (17)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (18)$$

$$R_{ns} = 0.75(0.05 + 0.73 \frac{n}{N}) R_a, \quad (19)$$

$$R_{nl} = 2 \times 10^{-9} (0.1 + 0.9 \frac{n}{N}) \times (0.56 - 0.079 \sqrt{e_d}) T_k^4, \quad (20)$$

$$R_a = \frac{15.54(\sin \alpha \sin \delta + \cos \alpha \cos \delta \cos \phi)}{S_0}, \quad (21)$$

$$\alpha = \arccos(-\tan \phi \tan \delta), \quad (22)$$

式中  $ET_{rad}$  为参考作物蒸散中的辐射项,  $ET_{aero}$  为参考作物蒸散中的空气动力学项,  $R_n$  为冠层表面净辐射,  $G$  为土壤热通量,  $e_0$  为饱和水汽压;  $e_d$  为实际水汽压,  $c$  为饱和水汽压—温度曲线斜率,  $R_{ns}$  为净短波辐射,  $R_{nl}$  为净长波辐射,  $R_a$  为大气上界辐射,  $\phi$  为干湿球常数,  $n/N$  为日照百分率,  $P$  为海拔高度  $H$  处的气压,  $P_0$  为海平面气压,  $H$  为海拔

高度,  $\phi$  为纬度,  $U_2$  为 2 m 高处的风速,  $\theta$  为太阳赤纬,  $U_z$  为测量点平均风速,  $Z$  为风速测量高度,  $\omega$  为时角,  $d_r$  为日地相对距离,  $S_0$  为太阳距离修正系数,  $T$  为平均气温,  $J$  为在年内的天数,  $C$  为修正系数。

### 2.3 数据来源与处理

选取中国西北地区 2002 年逐日 1.1 km 分辨率 NOAA/AVHRR 的 5 个通道原始数据。使用比利时佛莱芒区科技研究所遥感与大气过程中心(Vito/ Tap)开发的 NOAA-CHAIN 预处理系统对该数据集进行预处理(包括辐射纠正、大气纠正、去云处理和几何纠正等),处理后 1 和 2 通道为地表反射率,4 和 5 通道为亮温数据集。

气象资料采用美国 NCAR(National Center for Atmospheric Research of the USA)2002 年再分析资料,利用中国陆面数据同化系统中开发的大气同化系统(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所完成的国家自然科学基金项目:90202014),将 NCAR 数据集降尺度为空间分辨率 0.25° 和时间分辨率为 1 h<sup>[34]</sup>。该数据集包括 10 m 风速风向、2 m 气温、2 m 混合比湿、气压、上行下行短波和长波辐射、对流降水和大尺度降水等。同时利用了与模型匹配的 1 km 分辨率 DEM 数据和土地利用图。

## 3 反演结果与验证

由于黑河地区地表状况反差较大,净辐射通量和潜热通量的差异也较大。利用遥感蒸散模型反演得到 2002 年 8 月 17 日 14 时的净辐射通量,沙漠戈壁一般在 300~480 W·m<sup>-1</sup>,河岸和绿洲耕地为 500~610 W·m<sup>-1</sup>,林地和高覆盖草地一般在 610~695 W·m<sup>-1</sup>。这与郭晓寅<sup>[16]</sup>在黑河地区的反演结果接近,反演得到的潜热通量(图 1)在部分戈壁和沙漠区为负值,大部分地区在 100 W·m<sup>-1</sup>以下,河岸和绿洲耕地大部在 250~350 W·m<sup>-1</sup>之间,林地和高覆盖草地一般在 350~450 W·m<sup>-1</sup>。这与张万昌<sup>[17]</sup>、阎宇平等<sup>[35]</sup>在绿洲、沙漠夏季实测与模拟结果较一致。将反演结果与吴锦奎<sup>[36]</sup>利用 2004 年在黑河中游设立的试验点的观测资料,用波文比方法计算获得的蒸散进行比较,农田(以张掖观测点为代表)由观测计算得到的净辐射的日最大值一般为 590.3 W·m<sup>-1</sup>,潜热最大值一般为 390 W·m<sup>-1</sup>;由遥感反演得到的 8 月 17 日 14 时张掖观测点的地表净辐射为 603 W·m<sup>-1</sup>,潜热为 387 W·m<sup>-1</sup>;草地(以小屯观测点为代表)由观测

计算得到的净辐射的日最大值一般为 520 W·m<sup>-1</sup>,潜热最大值一般为 330 W·m<sup>-1</sup>。由遥感反演得到的 8 月 17 日 14 时小屯观测点的地表净辐射为 510 W·m<sup>-1</sup>,潜热为 210 W·m<sup>-1</sup>。可见,在

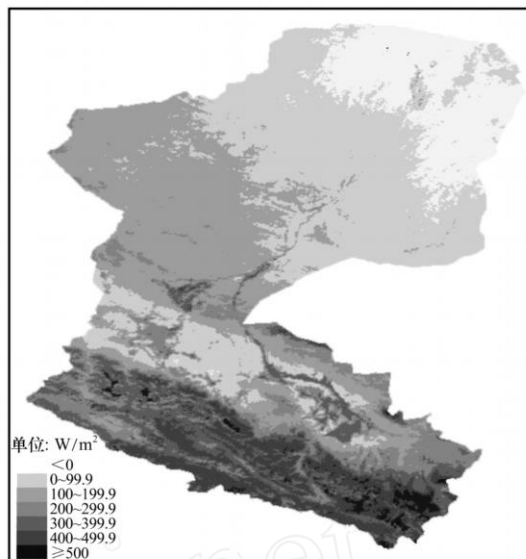


图 1 2002 年 8 月 17 日遥感反演的黑河流域潜在蒸散分布

Fig. 1 Latent heat flux distribution in Heihe River basin retrieved by remote sensing model on August 17, 2002

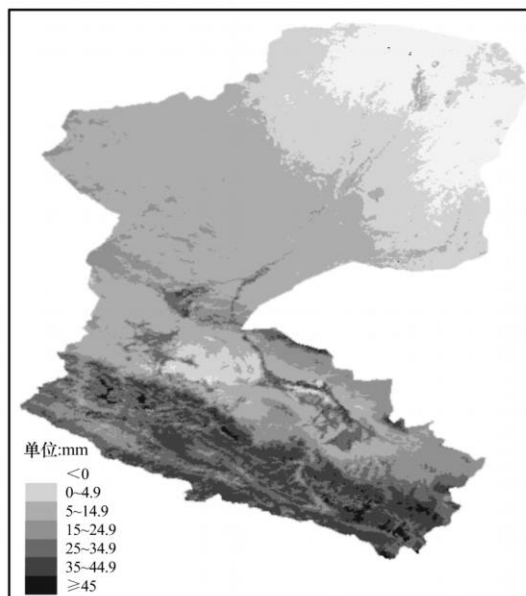


图 2 2002 年 8 月中旬利用遥感和 NCEP 分析资料计算的黑河流域的蒸散发

Fig. 2 ET distribution in Heihe River basin calculated by integration remote sensing data and NCEP grid data in the middle ten days of August 2002

农田反演结果与观测计算结果较一致, 但草地的潜热偏小。在比较中也发现, 在以平川为代表的荒漠点的潜热反演结果与观测计算结果偏大, 但反演出的潜热, 农田 > 草地 > 荒漠的趋势与观测分析较为一致。图 2 为 2002 年 8 月中旬利用遥感和气象资料综合计算得到的区域内的蒸散发量。结合黑河流域 2002 年土地利用图, 沙漠戈壁大部分不到 15 mm, 北部只有几毫米, 绿洲耕地及中覆盖度草地大部分在 15~40 mm, 南部山区由于植被和地形差异, 蒸散量差异较大, 高覆盖草地和林地的蒸散发量可以达到 30~45 mm 以上。此时正值黑河中游区玉米灌浆期, 据吴锦奎<sup>[36]</sup> 在农田试验点的观测分析, 在此期间玉米的日蒸散量平均为 4.1 mm/d, 玉米整个生育期的日蒸散量平均为 3.1 mm/d。从图 2 的反演计算结果可以得到观测点 8 月中旬的蒸散发量为 34.8 mm, 日平均为 3.5 mm/d, 与观测结果较为一致。

#### 4 小结

(1) 利用地表能量平衡和蒸散系数的理论和方法, 通过遥感和气象资料反演得到该区域的各能量通量, 反演结果与实测值及其他研究结果比较吻合。该区地形复杂, 自然环境差异较大, 模型结果能较好地反映这一特点。同时该方法能够估算逐日蒸散发, 弥补了气象资料分辨率较低的不足, 也使气象与遥感资料结合, 弥补了难以得到遥感逐日晴空资料的不足, 两者结合得到较高分辨率的逐日蒸散发结果。

(2) 参考作物蒸散的计算是有植被覆盖区的蒸散的计算方法, 在黑河流域的北部分布有戈壁、沙漠等, 即使在夏季植被覆盖也很低, 尽管计算结果显示这些区域的蒸散也很小, 但本文提供的这一比值的思路与方法在这些地区的应用, 仍需通过实验来验证。

(3) 由于遥感获得的是 1 km 下垫面的综合信息, 观测点测得的是单点的信息, 这就要求观测站具有足够的代表性或下垫面具有较好的均一性, 且该方法在使用过程中, 涉及到大量参数, 一些参数的获取具有很强的经验性, 这也是误差形成的原因之一。在验证过程中我们找到的资料主要是针对农田、森林和特定植被的, 如果要得到研究区域的更精确的蒸散发, 还需要对各参数的反演, 区分不同的生态系统作更细致地分析。

#### 参考文献

- [1] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[C]. Proc. Roy Soc London, 1948, A193: 120 - 146
- [2] Monteith J L. Evaporation and environment[J]. Symp Soc Exp Biol, 1965, 19: 205 - 234
- [3] Shuttleworth W J, J S Wallace. Evaporation from sparse crops—An energy combination theory[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1985, 111: 839 - 855
- [4] Priestley C H B, R J Taylor. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. Mon Wea Rev, 1972, 100(2): 81 - 92
- [5] Bastiaanssen W, M Menentim, R Feddes, et al. The surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 1 Formulation[M]. J Hydrology, Elsevier Science BV, 1998: 198 - 213
- [6] Su Z. The Surface Energy Balance System(SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. Hydrology and Earth System Sci, 2002, 6(1): 85 - 99
- [7] 何延波, Zhongbo Su, LI Jia, 等. SEBS 模型在黄淮海地区地表能量通量估算中的应用[J]. 高原气象, 2006, 25(6): 1092 - 1100
- [8] 陈镜明. 现用遥感蒸散模式中的一个重要缺点及改进[J]. 科学通报, 1988, 6: 454 - 457
- [9] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 非均匀陆面条件下区域蒸散发量计算的遥感模型[J]. 气象学报, 2002, 60(4): 508 - 512
- [10] 谢贤群. 遥感瞬时作物表面温度估算农田全日蒸散总量[J]. 环境遥感, 1991, 6(4): 254 - 260
- [11] 王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究(从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME- Tibet/ TIPEX)[J]. 高原气象, 1999, 18(3): 280 - 294
- [12] 陈添宇, 陈乾. 用气象卫星资料推算黑河地区地表特征参数[J]. 高原气象, 1992, 11(4): 431 - 439
- [13] 吴艾笙, 钟强. 黑河实验区地表反射率与植被指数的季节变化[J]. 高原气象, 1992, 11(4): 440 - 451
- [14] 马耀明, 戴有学, 马伟强, 等. 干旱半干旱区非均匀地表区域能量通量的卫星遥感参数化[J]. 高原气象, 2004, 23(2): 139 - 146
- [15] 马耀明, 王介民, Massimo Menenti, 等. 黑河试验区地表净辐射区域分布及季节变化[J]. 大气科学, 1997, 21(6): 743 - 749
- [16] 郭晓寅. 黑河流域蒸散发的遥感估算[D]. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所博士论文, 2002
- [17] 张万昌, 刘三超, 蒋建军, 等. 基于 GIS 技术的黑河流域地表通量及蒸散发遥感反演[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(增刊): 138 - 145
- [18] 吴锦奎, 丁永建, 魏智, 等. 黑河中游间作农田的辐射收支特征分析[J]. 高原气象, 2007, 26(2): 286 - 292
- [19] 乔平林, 张继贤, 王翠华. 石羊河流域蒸散发遥感反演方法[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(4): 107 - 110
- [20] 郭玉川, 董新光. SEBAL 模型在干旱区区域蒸散发估算中的应用[J]. 遥感信息, 2007, 3: 75 - 78
- [21] 潘志强, 刘高焕. 黄河三角洲蒸散的遥感研究[J]. 地球信息

- 科学, 2003, (3): 91 - 96
- [22] 刘蓉, 文军, 张堂堂, 等. 利用 MERIS 和 AATSR 资料估算黄土高原塬区蒸散发量研究[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 949 - 955
- [23] 潘卫华, 徐涵秋, 李文, 等. 卫星遥感在东南沿海区域蒸散(发)量计算上的反演[J]. 中国农业气象, 2007, 28(2): 154 - 158
- [24] 张杰, 李栋梁. 祁连山及黑河流域降雨量的分布特征分析[J]. 高原气象, 2004, 23(1): 81 - 88
- [25] 王介民, 刘绍民, 孙敏章, 等. ET 的遥感监测与流域尺度水资源管理[J]. 干旱气象, 2005, 23(2): 1 - 7
- [26] Muhammad Iqbal. An Introduction to Solar Radiation[M]. Academic Press Canada, 1983: 169 - 211
- [27] Ulivieri C, M M Castronuovo. A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites[J]. Adv Space Res, 1994, 14(3): 59 - 65
- [28] 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
- [29] Chehbouni A Qi, J Seen, D L Kerr, et al. Estimation of real evapotranspiration. <http://www.fao.org/docrep/W7320B/w7320b29.htm>, 2001
- [30] Crago R. Conservation and variability of the evaporative fraction during the daytime[J]. J Hydrology, 1996, 180: 173 - 194
- [31] 王菱, 倪建华. 以黄淮海为例研究农田实际蒸散量[J]. 气象学报, 2001, 59(6): 784 - 793
- [32] 毛飞, 张光智, 徐祥德. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较[J]. 应用气象学报, 2000, 11(增刊): 128 - 136
- [33] 杜尧东, 刘作新, 张运福. 参考作物蒸散计算方法及其评价[J]. 河南农业大学学报, 2001, 35(1): 57 - 61
- [34] 李新, 南卓铜, 吴立宗, 等. 中国西部环境与生态科学数据中心: 面向西部环境与生态科学的数据集成与共享[J]. 地球科学进展, 2008, 23(6): 628 - 637
- [35] 阎宇平, 王介民, M. Menenti, 等. 黑河实验区非均匀地表能量通量的数值模拟[J]. 高原气象, 2001, 20(2): 132 - 139
- [36] 吴锦奎. 内陆河流域中游绿洲农田能水平衡研究[D]. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所博士论文, 2006

## Remote Sensing Retrieval of Daily Evapotranspiration over the Heihe River Basin

LI Xing-min<sup>1-2</sup>, LU Ling<sup>1</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, YANG Wen-feng<sup>3</sup>,  
HUANG Chun-lin<sup>1</sup>, WANG Zhao<sup>4</sup>

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzou 730000, China;

2. Meteorological Institute of Shaanxi Province, Xi an 710015, China;

3. Shaanxi Meteorology Observatory, Xi an 710015, China;

4. Remote Sensing Information Center for Agriculture of Shaanxi Province, Xi an 710015, China)

**Abstract :** The estimation of evapotranspiration(ET) over heterogeneous land surface of arid and semi-arid regions is quite complicated and significant. NOAA/ AVHRR remote sensing, NCEP reanalysis grid and meteorological station data are used to estimate daily ET over the Heihe River basin based on the integrating surface energy algorithm for land model and the Penman method. As for clear days, Remote sensing model is used to retrieval the instantaneous ET to daily ET. FAO - 17 Penman method is also used to estimate the same day s reference crop ET by NCEP reanalysis grid data and the meteorological station data. The relationship between actual ET and the reference crop ET can be used to calculate the actual ET based on the results from FAO - 17 Penman method on the cloudy days. These results are validated by the observation data and other study in Heihe River basin. Integrate the remote sensing data and grid data can enhances the resolution of the NCEP grid data from 0.25 degree to 1.1 km by remote sensing data, and also make up deficiency of the remote sensing data on the cloudy days. This work will provide reference for similar research in this region.

**Key words :** Heihe River basin; Remote Sensing; Evapotranspiration