

# 皇甫川流域蒸散量遥感估算及动态变化研究

于红博<sup>1,2</sup>, 杨 劼<sup>1</sup>, 宋炳煜<sup>1</sup>

(1. 内蒙古草地生态重点实验室, 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010022)

**摘 要:** 利用遥感反演干旱区大面积区域的蒸散量, 对于该区域水资源的有效利用具有重要的指导意义。以鄂尔多斯高原皇甫川流域为研究区, 利用遥感方法对 1996 年、2003 年和 2007 年 3 期影像数据进行处理, 基于地表能量平衡原理, 结合同期气象资料, 估算出流域日蒸散量, 发现反演得到的日蒸散量分布与地表状况比较吻合, 植被覆盖区日蒸散量较裸地地区的日蒸散量大, 植被密集的地方蒸散值较大, 且明显高于植被稀疏的地区, 阳坡的蒸散量明显高于阴坡, 日蒸散量最大的对应于水体, 最小的为裸地。运用实测数据和 FAO 推荐式进行了局部验证, 证明该遥感方法具有一定的适用性。并对反演的 3 期蒸散量结果进行了对比分析, 发现从 1996 年到 2003 年和 2007 年, 8 月份流域日蒸散量呈逐年递减的趋势。

**关键词:** 皇甫川流域; 蒸散量; 动态变化

**中图分类号:** P332.2; TP79

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2013)01-0107-05

## Study on the Estimation and Dynamic Changes of Evapotranspiration in Huangfuchuan Watershed

YU Hong-bo<sup>1,2</sup>, YANG Jie<sup>1</sup>, SONG Bing-yu<sup>1</sup>

(1. *The Key Lab of Inner Mongolia Grassland, Hohhot 010021, China;*

*2. College of Geography Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)*

**Abstract:** Using remote sensing approach for retrieval of large area evapotranspiration has important guidance for effective utilization of water resources. The Huangfuchuan watershed located in Ordos Plateau which has been intensively studied in the past was taken as the study area. Remote sensing approach was used to retrieve instantaneous evapotranspiration based on the estimation of land surface characteristics and fluxes from Landsat-5 TM images collected in 1996, 2003, and 2007, and using auxiliary environmental data from the same time periods. Daily evapotranspiration was estimated by scaling. The result of evapotranspiration distribution was consistent with land surface conditions. The daily evapotranspiration of area covered by vegetation was higher than bare land. The daily evapotranspiration of dense vegetation was higher than the sparse. The daily evapotranspiration in sunny slope was higher than that in shady slope. The maximum daily evapotranspiration was water body and the minimum one was bareland. Results for 1996 and 2007 were verified by using measured data and the FAO method. This level of uncertainty was acceptable; therefore, the method was applicable. These three images were compared and evapotranspiration decreased from 1996 to 2003 and 2007.

**Key words:** Huangfuchuan watershed; evapotranspiration; dynamic change

水循环是全球气候系统中的一个主要组成部分, 在水循环的几个环节中, 蒸散占据非常重要的地位, 热量的释放和吸收是伴随着蒸散过程同时进行的, 全球约 60% 左右的降水被蒸散所消耗, 在农田系统中

则有 99% 的用水被蒸散消耗<sup>[1]</sup>。特别是在黄土丘陵沟壑干旱半干旱地区, 降水稀少, 蒸发力强, 平均土壤水分含量低, 水分奇缺是客观存在并难以改变的外部因素<sup>[2]</sup>, 因此水在这一地区成为植物生长与植被建设

收稿日期: 2012-05-29

修回日期: 2012-07-12

资助项目: 国家科技支撑项目(2011BAC07B01); 内蒙古自然科学基金项目(200711020505); 内蒙古师范大学基金项目(GCRC09004)

作者简介: 于红博(1977—), 女, 内蒙古呼和浩特市人, 博士, 副教授, 主要从事生态建模与遥感图像处理方面的研究。E-mail: y\_b\_fan6@yahoo.com.cn

通信作者: 杨劼(1965—), 女(蒙古族), 内蒙古呼和浩特市人, 博士, 教授, 主要从事植物生理和草地生态学研究。E-mail: jyang@imu.edu.cn

的主要限制因子<sup>[3-7]</sup>。清楚地认识蒸散,对于合理利用有限水资源具有重大意义<sup>[1]</sup>。本研究选择有大量数据积累的鄂尔多斯高原皇甫川流域为研究区,运用遥感方法,结合气象资料,对1996年、2003年和2007年3期影像进行处理,估算出该流域的日蒸散量,通过对比分析来初步探究黄土丘陵沟壑区区域蒸散量的变化。这对科学有效地利用干旱地区的有限水资源,对生态环境发展的可持续性以及水资源的可持续利用都具有重要的现实意义。

## 1 研究区概况与试验方法

### 1.1 研究区概况

皇甫川流域是黄河中游的一级支流,发源于鄂尔多斯高原与黄土高原的过渡地带,是半干旱区一条典型的季节性河流,在陕西省境内入黄河,介于39.2°—39.9°N,110.3°—111.2°E,全长120 km,面积约为3 240 km<sup>2</sup>,位于鄂尔多斯高原的东部,属于温带干旱半干旱典型草原区。

皇甫川流域较大的地势高差和较强的暴雨侵蚀使流域水系充分发育,加上现代加速的人为水土流失,将流域切割塑造造成梁峁窄小,沟壑密布,地形破碎的丘陵沟壑地貌,属于强烈水土流失区,是水土保持综合治理的主要区域。气温自西北向东南递增,年平均气温6.2~7.2℃,≥10℃积温2 900~3 500℃。该流域光能资源丰富,日照充足,大部分地区年日照时数在3 000 h以上。历年平均降雨量420~379 mm,并集中在夏季,6—8月份的降雨量占总降水量的61%。年平均蒸发量很大,为年平均降水量的2.7倍左右。年平均相对湿度53%~56%。冬春季风力强盛且频繁,平均风速2~3 m/s,大风日数10~30 d。地带性土壤为以砒砂岩为母质的栗钙土<sup>[8]</sup>。天然植被以小半灌木和草本植物居多,建群种有百里香(*Thymus serpyllum*)、本氏针茅(*Stipa bungeana*)等。人工植被以人工油松(*Pinus tabulaeformis*)、小叶杨(*Populus simonii*)、沙柳(*Salix psammophylla*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)为主。农作物以玉米(*Zea mays*)和糜子(*Panicum miliaceum*)等为主。

### 1.2 试验方法

本研究主要数据来源于本项目组对皇甫川流域2001—2007年的大量数据积累,主要测量的数据如下有:

1.2.1 群落特征调查 草本样方调查面积为1 m×1 m,对群落总盖度和植物种类组成以及每一物种的高度、密度、投影盖度、生物量(鲜重和干重)进行调查

和记录。灌木样方调查面积为10 m×10 m,测定每一植株的冠幅和株高,并选取样株用刈割法烘干称重,记录全树总叶干重。

1.2.2 叶面积与叶干重的测定 对采集的每个叶片用坐标纸计算叶面积,然后将叶片在60℃的烘箱中烘干,称重,建立叶面积和叶干重的回归关系。对灌丛确定标准株,采用整树刈割法,烘干称重,由全株叶干重推算全株总叶面积。群落叶干重由标准株叶干重和标准株的数量推得。

1.2.3 蒸腾测定 采用三种方法:用快速离体称重法测定草本蒸腾强度;用LI-6400便携式光合系统测定草本和灌木叶片蒸腾速率;用热耗散法(TDP)测定单株灌木的液流量。

1.2.4 群落蒸散量的测定 草本群落采用土柱称重法。称重时间为观测日的5:00—19:00,每隔1 h或2 h称重一次。根据土柱重量变化获得每小时土柱蒸散的平均值,以此计算出草本样地的蒸散量。每3 d重做一次土柱样品。灌木林的蒸散量=灌木的蒸腾量+棵间蒸散量。

1.2.5 气象数据 用自动气象站连续监测太阳总辐射(kW/m<sup>2</sup>)、空气温度(℃)、空气相对湿度(%)、2 m高处风速(km/h)、2 m高处风向(deg.)、10 cm土层处土壤温度(℃)、雨量(mm)等环境因子,每0.5 h记录一次。由气象部门提供1996年8月29日(沙圪堵气象站)、2003年9月2日和2007年8月12日(薛家湾气象站)8时、14时及日平均的地温、气温、大气相对湿度、风速、实际水气压、大气压,还有这3 d的实际日照时数。

1.2.6 遥感数据 遥感影像资料为1996年8月29日、2003年9月2日(包括皇甫川流域的大部分区域,大约有10%的面积没有被囊括进来)和2007年8月12日(包括皇甫川流域的大部分区域,大约有10%的面积没有被囊括进来)皇甫川流域的Landsat-5 TM卫星数据。

1.2.7 数据处理 用PCI、Erdas和ArcGIS软件对遥感影像进行处理、分析和制图。其中对影像的预处理部分包括辐射定标、大气校正、几何校正和图像裁剪。

## 2 理论及研究方法

本研究的方法体系如图1所示,主要基于地表能量平衡原理估算流域蒸散量。首先估算地表特征参数各分量,然后得到地表能量平衡各分量,由此算出日瞬时蒸散量,通过积分运算,将时间尺度扩大到日蒸散量。由于地表能量平衡方程只适用于陆地,因此将其中的水体单独进行处理,利用Penman公式进行水体日蒸发的计算<sup>[9]</sup>,最后整合到流域日蒸散中。

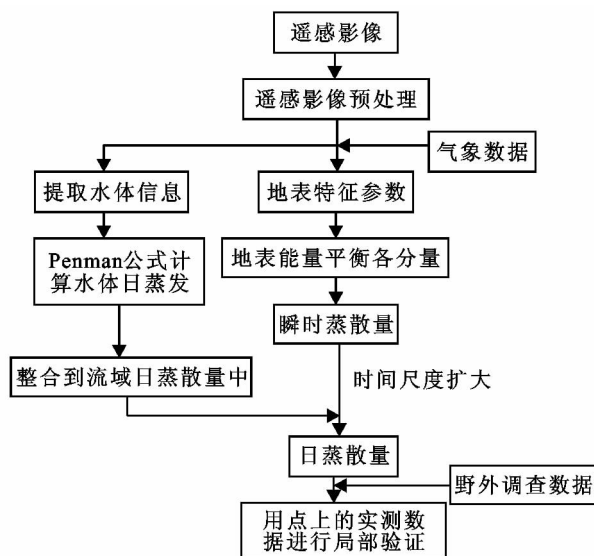


图 1 遥感反演流域日蒸散量技术流程图

## 2.1 日蒸散量

谢贤群<sup>[10]</sup>根据任一时刻的太阳辐射通量密度的日变化是正弦关系的原理,研究表明日蒸散量与某一时刻的蒸散量存在正弦关系,并对该正弦关系从 $[0, N_E]$ 进行积分得:

$$\frac{ET_d}{ET_{inst}} = \frac{2N_E}{\pi \cdot \sin(\pi \cdot t/N_E)} \quad (1)$$

式中: $ET_d$ ——日蒸散量(mm/d); $ET_{inst}$ —— $t_i$ 时刻的蒸散量(mm); $t$ ——从日出到时刻 $t_i$ 的时间间隔(h); $N_E$ ——日蒸散时数,即清晨蒸散开始时刻到傍晚蒸散减弱到接近于0时的时间长度(h),一般在日出后一小时和日落前一小时蒸散接近于0,因此, $N_E$ 取比理论日照时数少2 h。

## 2.2 瞬时蒸散量

根据潘志强等<sup>[11]</sup>的研究,瞬时蒸散量采用下式计算:

$$ET_{inst} = 3600 \frac{LE}{\lambda} \quad (2)$$

式中: $\lambda$ ——蒸发潜热 $[2.49 \times 10^6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})]$ ;  $LE$ ——潜热通量 $(\text{W}/\text{m}^2)$ 。

## 2.3 潜热通量

Priestley 和 Taylor 于 1972 年提出了一种直接计算潜热通量的方法<sup>[12]</sup>:

$$LE = \alpha(R_n - G) \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \quad (3)$$

式中: $R_n$ ——地表净辐射通量 $(\text{W}/\text{m}^2)$ ;  $G$ ——土壤热通量 $(\text{W}/\text{m}^2)$ ;  $\Delta$ ——饱和水汽压斜率 $(\text{kPa}/\text{K})$ ;  $\gamma$ ——潜在蒸散常数 $(\text{kPa}/\text{K})$ ,郭晓寅<sup>[13]</sup>提出在温带

$$G = \begin{cases} \frac{T_s}{\alpha} (0.0032\alpha + 0.0062\alpha^2) (1 - 0.978\text{NDVI}^4) \times R_n & \text{植被覆盖} \\ 0.20 \times R_n & \text{裸土} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $T_s$ ——地表温度 $(^\circ\text{C})$ ;  $\alpha$ ——地表反射率; $R_n$ ——

半干旱地区的 $\alpha$ 与NDVI、地表温度 $T_s$  $(^\circ\text{C})$ 和大气温度 $T_a$  $(^\circ\text{C})$ 之差有如下关系:

$$\alpha = 0.615 - 0.0343(T_s - T_a) + 0.85\text{NDVI} \quad (4)$$

## 2.4 净辐射通量

地面由于吸收太阳总辐射和大气逆辐射而增加热量,同时又向外放射长波辐射而损失热量。地面收入辐射能减去支出,所得辐射能的差值称为地面辐射差额<sup>[14]</sup>。地表净辐射通量的区域分布是由短波净辐射和长波净辐射共同决定的<sup>[15]</sup>,即地球表面的辐射平衡方程可表示为:

$$R_n = Q(1 - \alpha) + R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow} \quad (5)$$

式中: $R_n$ ——地表净辐射通量 $(\text{W}/\text{m}^2)$ ;  $Q$ ——太阳总辐射 $(\text{W}/\text{m}^2)$ ;  $R_{l\downarrow}$ ——大气下行长波辐射 $(\text{W}/\text{m}^2)$ ;  $R_{l\uparrow}$ ——地表长波辐射 $(\text{W}/\text{m}^2)$ ;  $\alpha$ ——地表反射率。

2.4.1 太阳总辐射 有大气时到达地表的太阳总辐射<sup>[14]</sup>为:

$$Q = I_0 d_r^2 \sinh \cdot P \quad (6)$$

式中: $h$ ——太阳高度角;  $P$ ——大气透明系数;  $d_r$ ——天文单位日地距离;  $I_0$ ——太阳常数,这里取 $1366.67 \text{ W}/\text{m}^2$ 。大气透明系数 $P$ 与纬度 $\varphi$ 之间的关系为<sup>[14]</sup>:

$$P = 0.0013\varphi + 0.72 \quad (7)$$

2.4.2 大气下行长波辐射 大气下行长波辐射 $R_{l\downarrow}$ (晴天)由式(8)<sup>[16]</sup>计算得到:

$$R_{l\downarrow} = [1 - a \exp(-b \frac{e_0}{T_a})] \sigma T_a^4 \quad (8)$$

式中: $a = 0.35$ ,  $b = 10.0 \text{ K}/\text{hPa}$ ;  $T_a$ ——百叶箱中的大气温度(K);  $e_0$ ——百叶箱中的水汽压(hPa);  $\sigma$ ——斯蒂芬—波尔兹曼常数,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

2.4.3 地表长波辐射 地表长波辐射 $R_{l\uparrow}$ 根据斯蒂芬—波尔兹曼定律,可表示如下:

$$R_{l\uparrow} = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (9)$$

式中: $\epsilon$ ——地表比辐射率;  $\sigma$ ——斯蒂芬—波尔兹曼常数;  $T_s$ ——地表温度(K),地表温度由遥感影像反演得到<sup>[17-18]</sup>。

## 2.5 土壤热通量

土壤热通量是热量平衡方程中的重要组成部分,它指的是由于传导作用而存储在土壤和植被中的那部分能量,表征土壤表层与深层间的热交换状况。在地表能量平衡方程中,表示地表可利用能量,虽然地表土壤热通量相对其它三个量比较小,却不容忽视。土壤热通量根据马耀明等<sup>[15]</sup>的研究由式(10)得到:

地表净辐射通量 $(\text{W}/\text{m}^2)$ ; NDVI——归一化植被指数。

## 2.6 水体日蒸发

在土壤热通量和潜热通量的计算过程中,将水体当作裸地进行处理。但水体和土壤的性质差别很大,因此,在计算日蒸散时,应将水体单独进行处理。本研究首先利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息<sup>[19]</sup>,利用 Penman 公式进行计算<sup>[9]</sup>,然后将结果整合到日蒸散量中。

## 2.7 结果检验

运用本项目组进行群落调查、实验研究以及数据分析处理得到的 2003 年主要群落蒸散实测值对该方法进行点上验证,结果如表 1 所示。最小相对误差为 4.77%,为本氏针茅群落;最大相对误差 34.43%,为坝耕地。平均相对误差为 17.47%,在误差允许范围之内。坝耕地的估算值与实测值相比偏小,误差较大。

表 1 2003 年流域蒸散模拟值与实测值对比

群落类型	模型估算值/ (mm·d <sup>-1</sup> )	实测值/ (mm·d <sup>-1</sup> )	相对误差/%
杨树林	2.9500	3.6325	18.79
油松林	2.9121	2.4281	19.93
中间锦鸡儿灌丛	2.3448	2.7200	13.79
沙棘灌丛	2.4161	2.7800	13.09
本氏针茅群落	2.4306	2.3200	4.77
坝耕地	3.4000	5.1850	34.43

利用 FAO 推荐的估算参考作物蒸散的 Penman-Monteith 公式对 1996 年和 2007 年皇甫川的坝耕地、裸地和林地(侧柏)进行了检验,根据 FAO 推荐

的作物系数,取农作物系数为 1.15,裸地为 0.8,林地为 1.08。检验结果如表 2 所示。

表 2 遥感估算流域蒸散与 FAO(P-M)方法值对比

植被覆盖 状况	时间	遥感估算值/ (mm·d <sup>-1</sup> )	P-M 值/ (mm·d <sup>-1</sup> )	相对误 差/%
坝耕地	1996	3.646	3.387	7.65
	2007	3.919	3.412	14.86
裸地	1996	1.986	2.356	15.70
	2007	1.902	2.374	19.88
林地	1996	2.802	3.180	11.89
	2007	2.973	3.205	7.24

由表 2 可知,最大相对误差为 19.88%,最小相对误差为 7.24%,平均相对误差为 12.87%,均在误差允许范围之内。证明该遥感方法具有一定的适用性。

## 3 结果与分析

反演得到的 1996 年和 2007 年的日蒸散量分别如图 2 所示(2003 年与 2007 年时间相距较近,地表状况变化不大),3 a 蒸散量的直方图如图 3 所示。由图 2 可看出,反演得到的日蒸散量分布与地表状况比较吻合,植被覆盖区日蒸散量较裸地区(裸河床、砒砂岩、沙地以及城区)大,植被密集的地方(河床两侧的农田、林区)蒸散值较大,明显高于植被稀疏的地区,由于该区沟壑密布,阳坡的蒸散量明显高于阴坡,日蒸散量最大的对应于水体,最小的为裸地。

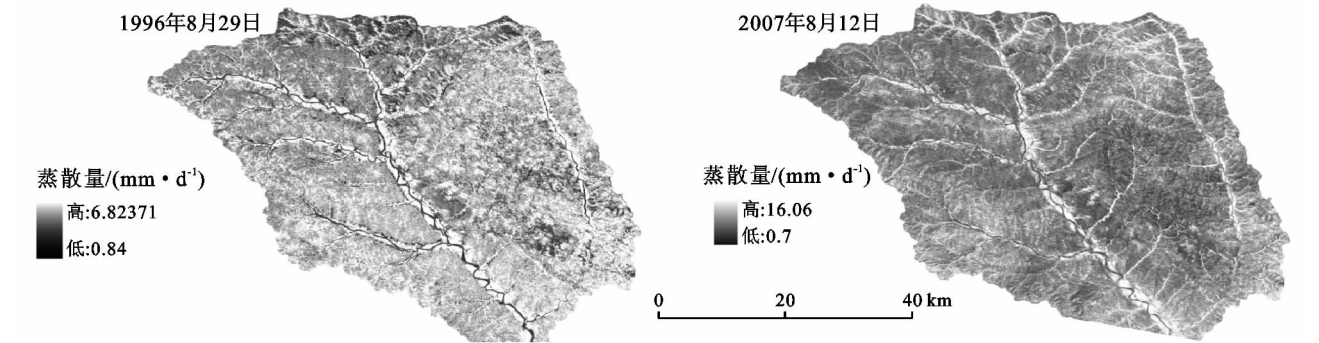


图 2 皇甫川流域不同时期 TM 影像反演的日蒸散量

由于 2007 年 8 月 12 日的潜热通量比 1996 年 8 月 29 日的潜热通量低,所以得到的蒸散量除水体外总体比 1996 年的小。水体由于 2007 年 8 月 12 日风速较大而使空气的动力作用受到较大影响,得到的蒸发量较 1996 年的大。由直方图可知,3 个年份日蒸散量的分布范围基本一致,主值区间为 1~4 mm/d,特别是 2003 年与 2007 年由于时间相距较近,地表状况变化不大,蒸散量分布情况相差无几。由于其瞬时蒸散量由大到小依次为:1996 年、2003 年、2007 年,且基本都在 8 月份,日长相接近,因此得到的日蒸散量顺序与此一致。经过统计分析,皇甫川流域 8 月份

平均日蒸散量随年代的增加呈递减趋势,由 1996 年的 2.50 mm/d,到 2003 年和 2007 年分别降到 2.32 mm/d 和 2.29 mm/d。蒸散量减小一是因为整个流域植被盖度逐年减小,根据遥感方法得到的 3 期影像的盖度值表明,整个流域平均植被盖度呈下降趋势,由 1996 年的 17.33%降到 2007 年的 11.25%;二是由于自 1999 年以来开始实行的“退耕还林还草”政策使农田面积有所减小,1996—2007 年 11 a 间农田的面积减少了 5.25%。

按生活型分类的各植被覆盖的地表,其日蒸散量均为正态分布,其分布峰值(指各直方图中占像素最

多的值,并不是日蒸散量最大值)为,1996 年:农田 2.64 mm/d,乔木林 2.58 mm/d,灌木林 2.44 mm/d,半灌木林 2.62 mm/d,草本 2.65mm/d,裸地 1.40 mm/d; 2003 年:农田 2.37 mm/d,乔木林 2.88 mm/d,灌木

林 2.32 mm/d,半灌木林 2.11 mm/d,草本 2.61 mm/d,裸地 1.85 mm/d;2007 年:农田 2.37 mm/d,乔木林 2.27 mm/d,灌木林 2.11mm/d,半灌木林 1.96 mm/d,草本 2.04 mm/d,裸地 1.60 mm/d。

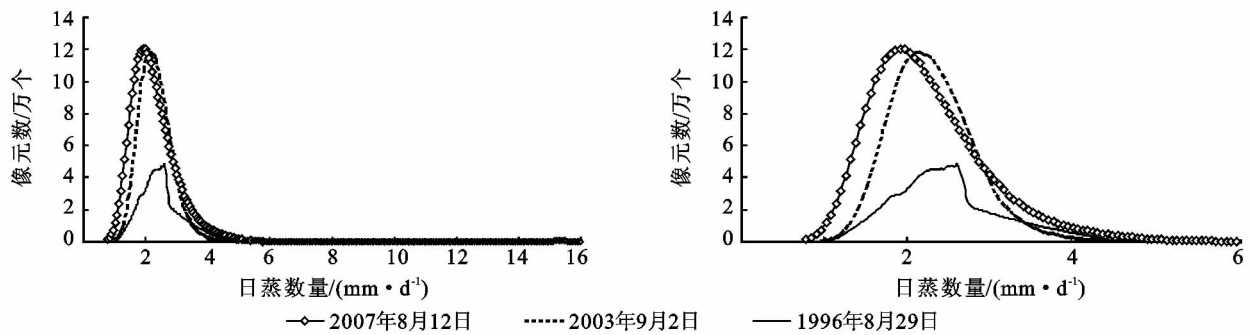


图 3 皇甫川流域日蒸散量分布直方图

## 4 结论

利用遥感反演得到的日蒸散量分布与地表状况比较吻合,植被覆盖区日蒸散量较裸地区(裸河床、砒砂岩、沙地以及城区)的日蒸散量大,植被密集的地方(河床两侧的农田、林区)蒸散值较大,明显高于植被稀疏的地区,由于该区沟壑密布,阳坡的蒸散量明显高于阴坡,日蒸散量最大的对应于水体,最小的为裸地。

分别用实测数据和 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式对结果进行了验证,平均相对误差分别为 17.49% 和 12.87%,在误差允许范围之内,证明该遥感方法具有一定的适用性。通过对比分析,从 1996 年到 2003 年再到 2007 年,8 月份流域日蒸散量呈逐年递减的趋势。

### 参考文献:

- [1] 刘惊涛,刘世荣. 植被蒸散研究方法的进展与展望[J]. 林业科学,2006,42(6):108-114.
- [2] 陈金永,陈亚宁,薛燕. 干旱区植物耗水量的研究与进展[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(6):152-158.
- [3] 徐炳成,山仑,陈云明. 黄土高原半干旱区植被建设的土壤水分效应及其影响因素[J]. 中国水土保持科学,2003,1(4):32-35.
- [4] 陈新军. 半干旱黄土丘陵区主要林分的水分生态研究[D]. 山东泰安:山东农业大学,2005.
- [5] Nishida K, Nemani R R. An Evapotranspiration Index from Aqua/MODIS for monitoring surface moisture status. IEEE Aqua Special Issue, 23 MAY 2002.
- [6] Sobrinho J A, Go'meza M, Jimenez-Munoz J C, et al. A simple algorithm to estimate evapotranspiration from DAIS data: application to the DAISEX campaigns[J]. Journal of Hydrology,2005,315:117-125.
- [7] Alsultan S, Arabia S, Lim S, et al. An Algorithm for

- Land Surface Temperature Analysis of Remote Sensing Image Coverage Over AlQassim, Saudi Arabia [Z]. From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8 Cairo, 2005.
- [8] 杨劼,高清竹,李国强,等. 皇甫川流域几种主要植物水分生态特征[J]. 生态学报,2004,24(11):2387-2394.
- [9] 程根伟,余新晓,赵玉涛,等. 山地森林生态系统水文循环与数学模拟[J]. 北京:科学出版社,2004.
- [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):253-260.
- [11] 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.
- [12] Unset A, Farre I, Martinez-Cob A, et al. Comparing Penman-Monteith and Priestley-Taylor approaches as reference-evaporespiration inputs for modeling maize water-use under Mediterranean conditions[J]. Agricultural Water Management,2004,66(3):205-219.
- [13] 郭晓寅. 黑河流域蒸散分布的遥感研究[J]. 自然科学进展,2005,15(10):1266-1270.
- [14] 徐玉貌,刘红年,徐桂玉. 大气科学概论[J]. 南京:南京大学出版社,2000.
- [15] 马耀明,王介民. 卫星遥感结合地面观测估算非均匀地表区域能量通量[J]. 气象学报,1999,57(2):180-189.
- [16] 黄妙芬,邢旭峰,朱启疆,等. 定量遥感地表净辐射通量所需大气下行长波辐射估算模型改进[J]. 地理研究,2005,24(5):757-766.
- [17] 于红博,杨劼,包铁军. 应用遥感方法估算皇甫川流域蒸散(发)量[J]. 水土保持通报,2008,28(1):102-105,114.
- [18] 于红博,杨劼,宋炳煜. 黄土丘陵沟壑区植物蒸腾和植被蒸散估算尺度转换模型研究[J]. 水土保持研究,2010,17(6):90-94.
- [19] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报,2005,9(5):589-595.