

利用 SEBAL 模型估算不同水土保持措施下的 流域蒸腾蒸发量*

——以韭园沟、裴家峁流域为例

高海东¹ 李占斌^{1,2†} 贾莲莲³ 李鹏²

(1 中国科学院水利部水土保持研究所 陕西杨凌 712100)

(2 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室 西安 710048)

(3 水利部黄河水利委员会黄河上中游管理局 西安 710021)

摘要 区域蒸腾蒸发量是重要的地表水分运动过程,水土保持措施改变了下垫面特征,从而影响了这一过程。为了揭示不同水土保持措施下的区域蒸腾蒸发特点,本文选取黄土高原丘陵沟壑区韭园沟治理流域以及其对比流域裴家峁,运用基于能量平衡原理的 SEBAL 遥感模型,计算了不同下垫面的蒸散发量,结果表明:研究区地表反照率多集中于 0.1~0.2 之间;不同水土保持治理度下的流域归一化植被指数 NDVI 呈现出不同的季节变化特点;净辐射集中在 400~800 W m⁻²,感热通量集中在 50~200 W m⁻² 之间,土壤热通量集中在 100~200 W m⁻² 之间;治理度高的韭园沟流域日蒸腾蒸发量略小于裴家峁流域,不同土地利用类型下的日蒸腾蒸发量顺序为坝地>果园及林地>草地>梯田>坡耕地。文章最后,作者从多个角度对计算结果的合理性进行了分析,表明 SEBAL 模型估算的流域蒸散发是可信的。

关键词 蒸腾蒸发量; SEBAL; 水土保持措施; 韭园沟

中图分类号 S157.2 文献标识码 A

区域蒸腾蒸发量(ET)估算包括土壤蒸发及植物蒸腾两部分。它是土壤-植物-大气系统中一项非常重要的能量、物质的转换和输送过程。它既是地表热量平衡的分量,又是水量平衡的分量。蒸发过程伴随着能量吸收和释放,因此地表蒸腾蒸发量有机地结合了热量平衡方程与质量守恒方程。蒸发的强弱与植物 CO₂ 的吸收、释放(光合作用),与植物干物质积累和产量,与作物估产、农业旱灾、水资源的合理利用密切相关。因此蒸发是气候和自然环境形成与变迁中的活跃因素^[1]。

传统获取 ET 有测量和计算两种方法,ET 的测量方法主要采用水量平衡法、器测法以及植物生理测定技术;ET 的计算方法大致可分为基于温度的方法、基于辐射的方法和基于两者结合的著名的彭曼计算方法^[2-3],比如:波文比-能量平衡法、空气动力学法、Penman-Monteith 公式法和考虑土壤-植物-大

气系统的水热通量传输机制的 SiB、同温模式等方法。这些传统的方法只能提供特定位置的点值而不能在区域尺度上计算蒸腾蒸发量。遥感技术的发展为大面积估算 ET 提供了一种非常有用的手段。

随着多光谱、多时相卫星遥感技术的发展,使得能够获得区域尺度下垫面的几何结构、湿热状况、生物物理等多种重要空间分布的信息成为可能^[4];另一方面,遥感监测是一个区域,具有空间的连续性和时间的重返性,可以弥补地面站点观测稀少的状况,这两方面的优点体现出遥感技术在蒸散发估算中存在的巨大潜力。

遥感研究蒸发,主要基于地表的热量平衡与水分平衡,运用遥感技术方法提取土壤-植物-大气界面的能量信息。例如用多时相热红外遥感提取土壤-植物的温度和水分状况信息,用多光谱、多角度

* 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403302)、国家自然科学基金项目(40971161,41071182)和中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划-流域水土过程模拟资助

† 通讯作者:李占斌(1962—)男,河南镇平人,教授,博士生导师,研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: zbli@126.com

作者简介:高海东(1983—)男,内蒙古鄂尔多斯人,博士研究生,主要研究方向为土壤侵蚀与遥感。E-mail: hdgao@msn.cn

收稿日期:2011-08-02;收到修改稿日期:2011-11-01

遥感提取下垫面几何结构的信息等。同时再结合地面气象台站的有关资料,提高遥感区域蒸腾蒸发量的估算精度。

遥感反演区域的蒸散发研究近年来发展很快, Brown 和 Rosenberg^[5] 根据能量平衡、作物阻抗原理建立了作物阻抗-蒸散发模型; Idso^[6] 发展了用遥感估算潜在蒸散发的经验模型; Suguin^[7] 利用遥感资料建立了计算冠层日蒸腾蒸发量的遥感统计模型; Shuttleworth 和 Gurney^[8] 建立了计算蒸散发的双层模型; Roerink^[9] 建立了 SEBI 模型; Bastiaanssen^[10-11] 建立了 SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) 模型; Su^[12] 建立了地表能量平衡系统模型 SEBS (The Surface Energy Balance System)。

SEBAL 模型应用于晴朗天气条件下具有“极干”和“极湿”表面的研究区,利用可见光、近红外和热红外数据,反演地表反照率、归一化植被指数 NDVI、地表比辐射率、地表温度等参数,结合较少气象参数,如大气温度、风速和大气透过率及植被高度等下垫面信息,不需要进行数值计算,就可以得到不同土地覆盖类型的净辐射通量、土壤热通量和感热通量,用剩余法得到潜热通量(蒸散发),该模型被众多研究案例证明是有效和实用的^[13-17]。

水土保持措施通过改变微地形、地表覆盖和土壤特性等边界条件,影响降水的分配、蒸散发和径流的产生机制,从而影响了流域的水文水资源过程^[18-19]。水土保持的水文水资源效应研究大都采用试验流域的方法,且主要集中在水土保持对坡面产流、流域径流量以及土壤含水量的研究,关于蒸散发的研究报道尚不多见。因此,本文基于 SEBAL 模型,使用遥感手段估算流域不同水土保持措施下的蒸腾蒸发量,阐明水土保持措施对流域蒸散发的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

韭园沟流域位于陕西省绥德县城东北约 5 km

处,是无定河左岸的一条支沟,全流域面积 70.7 km²。流域内丘陵起伏,沟壑纵横,属黄土丘陵沟壑区第一副区,主沟全长 18 km,5 km 以上的支沟有 10 条,沟壑密度 5.34 km km⁻²。流域多年平均降水量为 450 mm,集中在 7 月至 9 月的雨量占年降水量的 60%~70%,暴雨最大强度 3.5 mm min⁻¹,多年平均温度 9.3℃。流域主要的土壤类型为黄绵土,土壤质地疏松匀细,空隙较大,易冲刷,侵蚀严重,侵蚀方式以水蚀为主,治理前多年平均侵蚀模数 1.8 × 10⁴ t km⁻² a⁻¹,该流域从 1953 年开展水土保持工作以来,截止目前,共修梯田 16.94 km²,水浇地 0.51 km²,坝地 2.78 km²,造林 12.30 km²,种草 1.26 km²,大中型淤地坝 206 座,流域治理度达 69%。

裴家峁流域位于无定河下游左岸,紧挨韭园沟,为其对比流域,流域面积 41.5 km²。流域相对高差 250 m 左右,主沟长 11 km,沟床比降 1.22%,沟壑密度 2.69 km km⁻²。流域坡面为黄棉土覆盖,沿沟两岸有三叠纪灰色砂岩分布,沟底为石质沟床,有地下水流出。全流域除部分农地和可以放牧的自然荒坡外,其余为裸地、陡崖、村庄、道路和沟床。该流域水土流失严重,历年来也有零星治理,但因治理程度差,基本上仍属非治理沟。

1.2 数据来源与处理

由于前期降雨对蒸发影响复杂,因此本研究选择无云,前五天降雨总量为 0 的遥感影像,作为研究的基本数据,经过筛选,2006-09-10 的 TM 影像符合要求。该景影像获取时间为 UTC 时间 2:55,北京时间为 10:55。同时,确定当天相应的气象参数,数据来源于国家气象信息中心气象资料室,见表 1。

除了 TM 影像和气象参数外,模型还需要 DEM 以及不同植被高度信息,DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 (<http://datamirror.csdb.cn>),数据格式为 ERDAS IMAGINE 格式,分辨率为 30m,UTM 投影;植被高度信息为实地测量。

表 1 TM 影像获取日期气象参数

Table 1 Weather parameters of the same date as of TM image

平均气压 Average air pressure(hPa)	平均气温 Mean temperature(°C)	平均相对湿度 Average relative humidity(%)	平均风速 Average wind speed(m s ⁻¹)	日照时数 Sunshine hours(h)	前五天降雨总量 Total rainfall of the preceding 5 days(mm)
916.3	13.3	65.0	0.9	10.9	0.0

1.3 SEBAL 模型原理

1.3.1 基本原理 SEBAL 模型计算过程中包括了地表辐射平衡和地表能量平衡两个过程,首先利用 Landsat TM/ETM⁺ 影像各波段和数字高程模型 (DEM) 计算地面反照率、归一化植被指数 NDVI、比辐射率以及地面温度,然后根据上述地表特征参数

分别计算出净辐射通量 R_n 及进入土壤和空气而损失的能量 G 和 H ,最后由能量平衡方程计算蒸腾蒸发量 E ,见图 1。

$$\lambda E = R_n - G - H \quad (1)$$

式中 λ 为汽化潜热, E 为蒸腾蒸发量, R_n 为净辐射通量, G 为土壤热通量, H 为感热通量。

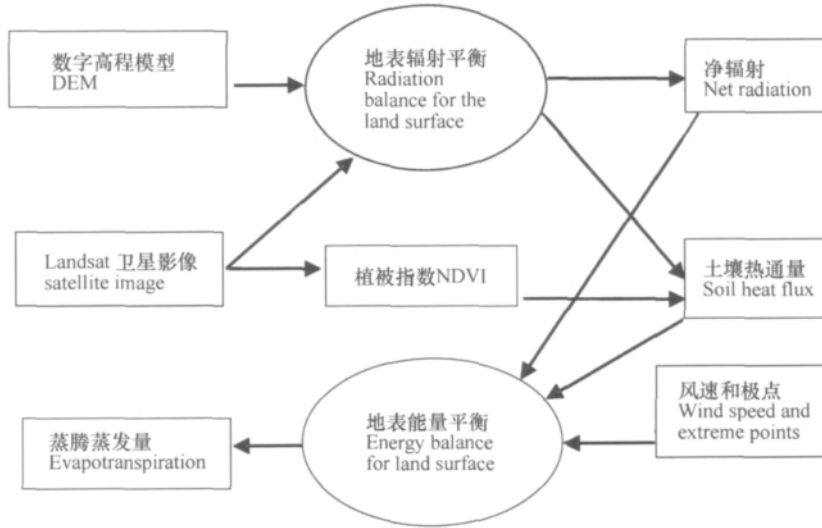


图 1 SEBAL 计算流程图

Fig. 1 Flowchart of SEBAL computation

1.3.2 地面特征参数确定 (1) 大气外光谱反射率 r_b 。Landsat TM/ETM⁺ 波段 1 ~ 5 和 7 的波长在 0.45 ~ 2.35 μm 之间,接收的主要是地面物体反射的太阳辐射,据此,可计算地面物体在大气外的光谱反射率 r_b ^[20]:

$$r_b = \frac{\pi L_b d^2}{E_b \cos(\theta)} \quad (2)$$

式中 L_b 为地面物体在波段 b 处的大气外光谱辐射亮度(单位: $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$) d 为日地天文单位距离 E_b 为波段 b 处的平均大气外太阳光谱辐照度(单位 $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) θ 为太阳天顶角(单位: rad)。

(2) 地面反照率 α 。根据公式(2)得到的各波段反射率计算大气外的反照率 a_{toa} ,

$$a_{toa} = \sum [c_b r_b] \quad (3)$$

式中 c_b 为波段 b 的权重系数; r_b 为波段 b 的反射率。

对大气外反照率作简单的大气辐射校正,得到地面反照率 a ^[21]:

$$a = \frac{a_{toa} - a_{path}}{\tau} \quad (4)$$

式中 a_{path} 为程辐射, τ 为大气单向透射率。

(3) 归一化差值植被指数。

$$NDVI = \frac{r_4 - r_3}{r_4 + r_3} \quad (5)$$

式中 r_3 和 r_4 分别为公式(2)计算的波段 3(近红外)和波段 4(红)的反射率。

(4) 比辐射率 ϵ 。SEBAL 中采用经验公式计算比辐射率 ϵ ^[22]:

$$\epsilon = 1.009 + 0.047 \ln NDVI \quad (6)$$

式中 $NDVI > 0$, 否则假设 ϵ 为 0。

(5) 地面温度 T_s 。地面温度采用 Stefan-Boltzmann 公式^[20]计算:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_6} + 1 \right) \epsilon^{1/4}} \quad (7)$$

式中 L_6 为地面物体在波段 6 处的大气外光谱辐射亮度 K_1 和 K_2 为计算常数。

1.3.3 确定能量平衡各分量 (1) 净辐射通量 R_n (单位: W m^{-2})。根据辐射表面平衡方程有:

$$R_n = (1 - a) S_{in} + (L_{in} - L_{out}) - (1 - \epsilon) L_{in} \quad (8)$$

式中 S_{in} 为入射短波辐射 L_{in} 为入射长波辐射,

L_{out} 为出射长波辐射, 单位均为 $W m^{-2}$ 。

$$S_{in} = G_{sc} \times \cos(\theta) \times d \times \tau \quad (8.1)$$

$$L_{in} = 1.08(-\ln \eta)^{0.265} s T_{oref} \quad (8.2)$$

$$L_{out} = \varepsilon s T_s \quad (8.3)$$

G_{sc} 为太阳常数 ($1367 W m^{-2}$), s 为 Stefan Boltzman 常数 ($5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$), T_{oref} 为空气温度。

为了消除因地形的起伏造成的入射太阳辐射在非水平表面的余弦效应, 本文对净辐射通量的计算采用了经过坡地和山区修正过的算法, 具体见文献 [21]。

(2) 土壤热通量 G (单位: $W m^{-2}$)。直接计算土壤热通量比较困难, SEBAL 中采用与 $NDVI$ 和 R_n 相关的经验公式。对于水体, 采用 $G = R_n - 90$ 进行计算, 其余土地利用类型采用公式 (9) 计算:

$$G = 0.30 \times (1 - (0.98 \times NDVI^4)) \times R_n \quad (9)$$

(3) 感热通量 H (单位: $W m^{-2}$)。计算感热通量 H 的公式为:

$$H = \rho_a c_p \frac{T_1 - T_2}{r_{ah}} \quad (10)$$

式中 ρ_a 为空气密度 (单位: $kg m^{-3}$), c_p 为空气定压比热容 (单位: $J kg^{-1} K^{-1}$), T_1 为地面 z_1 (取 0.1 m) 高度处温度, T_2 为地面 z_2 (取 2 m) 高度处温度, r_{ah} 为热传输气动阻力 (单位: $s^{-1} m$)。 H 、 $(T_1 - T_2)$ 和 r_{ah} 都是未知量, 且彼此直接相关。SEBAL 中采用迭代算法计算, 迭代步骤如下:

(a) 根据稳定表面的风廓线关系估算摩擦速度的空间分布, 稳定表面风廓线关系如公式 (11):

$$\frac{u_x}{u_*} = \frac{\ln\left(\frac{z_x}{z_{0m}}\right)}{k} \quad (11)$$

式中 u_* 为摩擦速度 (单位: $m^{-1} s$); u_x 为高度 z_x 处的风速 (单位: $m^{-1} s$); z_x 为风速观测高度 (单位: m); z_{0m} 为动量表面粗糙度, $z_{0m} = f(NDVI)$; k 为 Karman 常数 (0.41)。

(b) 利用公式 (12) 估算热传输气动阻力 r_{ah} :

$$r_{ah} = \frac{\ln(z_2/z_1)}{u_* \times k} \quad (12)$$

(c) 假定 $(T_1 - T_2)$ 与 T_s 成线性关系, 建立经验公式 $T_1 - T_2 = aT_s + b$ 。通过选择图像上的“极冷点” (植被覆盖度高, 地表温度最低, $H = 0$) 和“极热点” (植被覆盖度低, 地表温度最高, $\lambda E = 0$) 求解线性回归系数初始值 a 和 b 。联合初始 a 和 b 值, 利用公式 (10) 求解感热通量 H 。用初始 H 值计算 Monin-

Obukov 长度并进行大气稳定修正。得到修正以后的空气动力学阻抗后, 重新取“极热点”对应的空气动力学阻抗值, 确定线性回归系数 a 和 b 。重复上述过程, 迭代至“极冷点”和“极热点”的空气动力学阻抗及 a 和 b 均收敛位置。

(d) 由于表面加热导致的低层大气内不稳定性, 需要利用 Monin-Obukov 法对 r_{ah} 进行校正, 而计算 Monin-Obukov 长度时又要用到感热通量 H , 因此只能进行迭代求解。重复上述步骤 5 次以上, 即可确定感热通量 H 。感热通量的算法不涉及气温、湿度等气象观测数据, 迭代机制保证了热量传输粗糙长度、温度梯度与感热通量耦合关系的自动调整, 使遥感辐射温度直接用在感热通量的计算中, 避免了剩余阻抗的经验性调整和气象要素插值带来的误差。

(4) 潜热通量 λE 。根据能量平衡方程式 (1) 计算瞬时潜热通量 λE 。

(5) 24h 实际蒸腾蒸发量 E_{24} 。以上各通量分量是根据遥感影像计算得到, 因此是瞬时通量。假定 24h 蒸发率 W 为一常数:

$$W = \frac{\lambda E}{R_n - G} = \frac{R_n - G - H}{R_n - G} \quad (13)$$

则 24h 实际蒸腾蒸发量 E_{24} 为:

$$E_{24} = 86400W(R_{n24} - G_{24})/\lambda \quad (14)$$

式中 R_{n24} 和 G_{24} 分别为日平均净辐射通量和日平均土壤热通量。

1.3.4 模型实现 模型在 ERDAS IMAGINE9.1 的 Spatial Modeler 模块中使用图形化建模工具 Model Maker 实现, 总计 25 个模型, 依次运行即得计算结果。

2 结果与讨论

2.1 研究区地表反照率与归一化植被指数 NDVI 特点

地表反照率是地球表面总的反射辐射通量与入射辐射通量之比, 表征地球表面对太阳辐射的反射能力。地表反照率分布曲线图显示, 研究区地表反照率多集中于 0.1 ~ 0.2 之间, 平均值为 0.135, 标准差为 0.034。说明当时条件下研究区地表对太阳辐射的反射能力差别不大。

为了对研究区不同时段 NDVI 做出全面分析, 本研究共选择 2007-05-24、2007-06-25、2006-07-24、2007-08-12、2006-09-10 等 5 幅图像

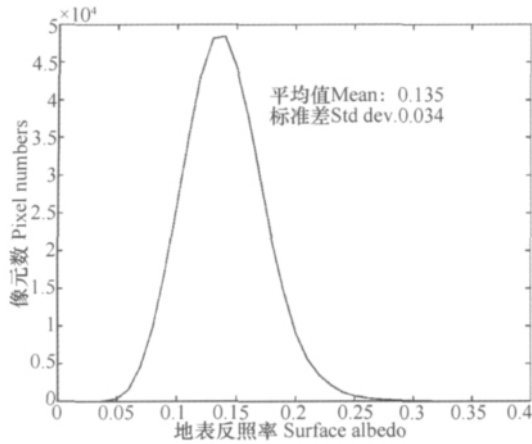


图2 研究区地表反照率分布曲线图
Fig. 2 Distribution curve of surface albedo in study area

进行计算,并进行 NDVI 的分段统计,共分为 0~0.1、0.1~0.2、0.2~0.3、0.3~0.4、0.4~0.5、0.5~0.6、0.6~0.7、0.7~0.8 八个范围,统计结果见表 2。

表 2 显示,韭园沟流域 5 月份 NDVI 比例最大的是 0.2~0.3 之间,其次为 0.3~0.4 之间,6 月份比例最大的是 0.3~0.4 之间,其次为 0.2~0.3 之间,7 月份 NDVI 值在 0.3~0.4 之间的比例进一步增加,8 月份 NDVI 比例最大的为 0.5~0.6 之间,表明植被覆盖度进一步提高,0.4~0.5 之间的比例也大幅提高,并且 0.5~0.6 之间的比例也超过 5%,至 9 月份,NDVI 比例最大的范围退至 0.4~0.5 之间,而 0.5~0.6 之间的比例大幅降低,表明植被覆盖度开始降低。

表 2 韭园沟、裴家峁不同时段不同 NDVI 比例统计表

Table 2 Statistics of NDVI proportions at different times at Jiuyuangou and Peijiamao(%)

分级 Classification	韭园沟 Jiuyuangou					裴家峁 Peijiamao				
	05-24	06-25	07-24	08-12	09-10	05-24	06-25	07-24	08-12	09-10
0~0.1	0.02	0.01	0.00	0.01	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1~0.2	2.45	0.39	0.35	0.02	0.34	2.57	0.10	0.00	0.02	0.01
0.2~0.3	55.95	29.66	34.75	0.75	1.75	60.13	32.12	13.79	0.19	0.34
0.3~0.4	34.31	52.10	60.54	4.96	20.51	33.12	57.67	74.77	8.21	16.83
0.4~0.5	6.89	17.56	3.92	41.29	60.18	3.92	9.97	11.04	54.74	59.56
0.5~0.6	0.39	0.28	0.43	46.28	16.65	0.25	0.15	0.39	34.19	21.87
0.6~0.7	0.00	0.00	0.01	6.63	0.48	0.00	0.00	0.00	2.65	1.38
0.7~0.8	0.00	0.00	0.00	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02

裴家峁流域与韭园沟流域有类似的特点,区别在于 8 月份 NDVI 比例最大出现在 0.4~0.5 之间,而不是韭园沟的 0.5~0.6 之间,同时,裴家峁流域 NDVI 月分布特征和韭园沟相比,出现了“马太效应”,即,不同月份特定范围的比例出现了聚集现象,而不同于韭园沟流域的不同月份内分布较为均匀的特点。如 7 月份,裴家峁 NDVI 集中分布在 0.3~0.4 之间,其次为 0.2~0.3 之间,二者相差达 60.98%,而非园沟 7 月份 NDVI 分布最广为 0.3~0.4,其次为 0.2~0.3,二者相差仅为 25.79%,这反映了裴家峁流域植被类型较韭园沟单一的特点。

2.2 净辐射、感热通量与土壤热通量特征

研究区净辐射集中在 400~800 W m⁻²,波峰出现在 580 W m⁻²左右,平均值为 569 W m⁻²。感热通量主要分布在 50~200 W m⁻²之间,平均值为 115 W m⁻²。土壤热通量取值范围较窄,集中在 100~

200 W m⁻²之间,平均值为 163 W m⁻²。其分布态势基本与净辐射相似,这也证明了土壤热通量和净辐射通量之间有一定的相关性^[1],对比三者的标准差可以发现,研究区净辐射的差别较大,而土壤热通量的差别较小,三者均呈现出单峰的正态分布。

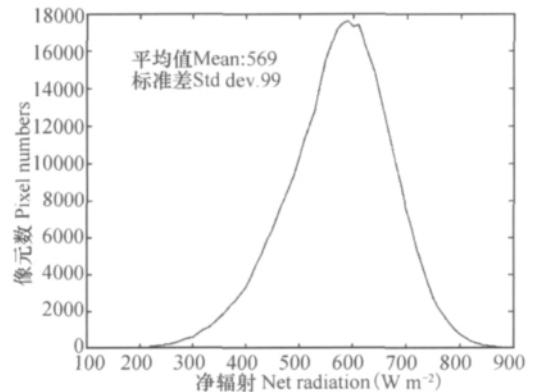


图3 研究区净辐射分布曲线图
Fig. 3 Distribution curve of net radiation in study area

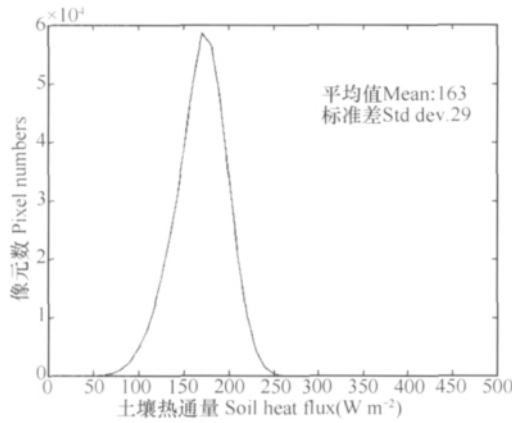


图 4 研究区土壤热通量分布曲线图

Fig. 4 Distribution curve of soil heat flux in study area

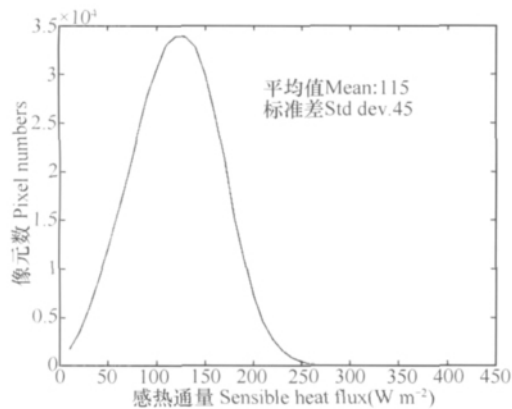


图 5 研究区感热通量分布曲线图

Fig. 5 Distribution curve of sensible heat flux in study area

2.3 研究区 24h 蒸腾蒸发量特点

根据图 7 研究区日蒸腾蒸发量集中在 2~6 mm 之间,平均值为 4.30 mm,本研究使用 ArcGIS 的 Zonal Statistics 区域统计功能,分别获取韭园沟流域 2006 年 9 月 10 日平均蒸腾蒸发量为 4.24 mm d⁻¹,标准差为 1.18 mm d⁻¹,裴家峁流域平均蒸腾蒸发量为 4.46 mm d⁻¹,标准差为 1.14 mm d⁻¹,治理的韭园沟流域蒸腾蒸发量略小于未治理的裴家峁流域。

根据 QuickBrid 影像的韭园沟子流域王茂沟流域的土地利用分类结果,运用区域统计功能,统计了不同土地利用下的平均日蒸腾蒸发量,见表 4。结果显示,坝地蒸腾蒸发量最大,为 4.98 mm d⁻¹,其次为果园及林地,为 4.78 mm d⁻¹,再次为草地,蒸腾蒸发量为 4.49 mm d⁻¹,而梯田和坡耕地蒸腾蒸发量最小,分别为 3.82 mm d⁻¹、3.76 mm d⁻¹。

虽然坝地、果园以及林地的蒸腾蒸发量较大,

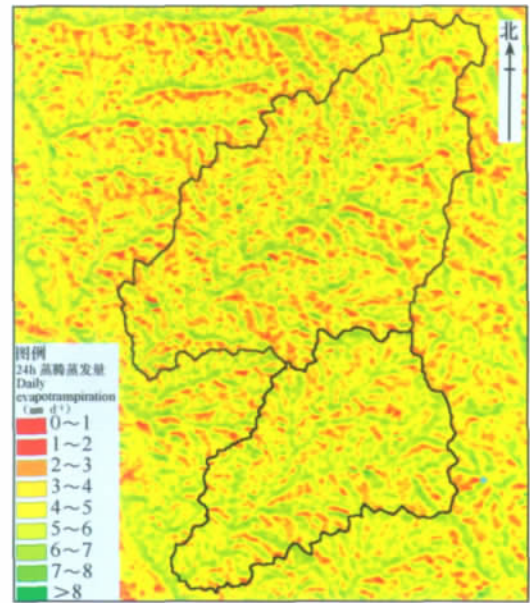


图 6 研究区 24h 蒸腾蒸发量分布图

Fig. 6 Daily evapotranspiration map in study area

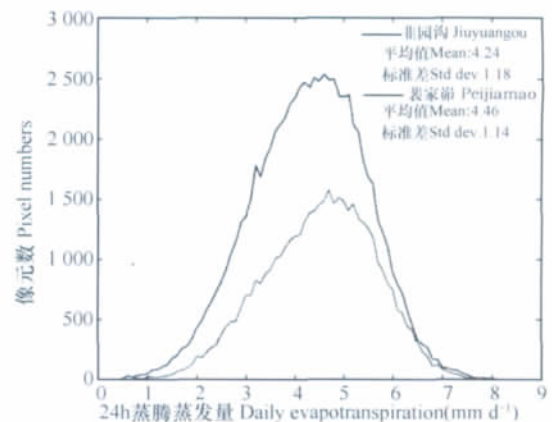


图 7 研究区 24h 蒸腾蒸发量分布曲线图

Fig. 7 Distribution curve of daily evapotranspiration in study area

但是其比例较低,韭园沟流域由于梯田比例的增加,导致了韭园沟平均蒸腾蒸发量略小于裴家峁。

表 3 不同土地利用下的平均蒸腾蒸发量

Table 3 Average evapotranspirations from different landuse

土地利用类型 Land use type	平均日蒸发 Average daily evapotranspiration(mm)
坝地 Check dam farmland	4.98
果园及林地 Orchards and woodland	4.78
草地 Grassland	4.49
梯田 Terrace	3.82
坡耕地 Slope land	3.76

根据表 4 统计的韭园沟和裴家茆流域的不同土地利用类型日总蒸腾蒸发量结果显示,韭园沟坡耕地日总蒸发最大,其次为草地,梯田以及果园林地次之,坝地日总蒸发量最小,为 $1.38 \times 10^4 \text{ m}^3$,裴家

茆流域日总蒸发以坡耕地为主,达 $8.36 \times 10^4 \text{ m}^3$,其次为草地,为 $5.74 \times 10^4 \text{ m}^3$,其余类型日总蒸发量较小,坝地仅为 $0.19 \times 10^4 \text{ m}^3$,这主要与各土地利用类型面积密切相关。

表 4 不同土地利用类型日总蒸腾蒸发量

Table 4 Daily total ET of different land use

土地利用类型 Land use type	韭园沟 Jiuyuangou			裴家茆 Peijiamao		
	面积 Area (km^2)	比例 Proportion(%)	日总蒸发量 Daily total ET($\times 10^4 \text{ m}^3$)	面积 Area (km^2)	比例 Proportion(%)	日总蒸发量 Daily total ET ($\times 10^4 \text{ m}^3$)
坝地 Check dam farmland	2.78	3.93	1.38	0.38	0.92	0.19
果园及林地 Orchards and woodland	12.31	17.41	5.88	5.18	12.49	2.48
草地 Grassland	16.96	23.99	7.62	12.78	30.78	5.74
梯田 Terrace	16.94	23.97	6.47	0.71	1.71	0.27
坡耕地 Slope land	20.93	29.60	7.87	22.24	53.59	8.36

2.4 计算结果合理性分析

为了验证 SEBAL 反演蒸发的合理性,本研究使用绥德站 2006 年 9 月 10 日实测气象参数:最低气温 4.9°C ,最高气温 23°C ,相对湿度 65% ,日照时数 10.9 h ,风速 0.9 m s^{-1} 以及北纬 37° ,高程 930 m 的辅助数据,利用联合国粮农组织修正的 Penman 公式计算日蒸腾蒸发量,结果为 4.10 mm d^{-1} 。SEBAL 计算的流域平均蒸发为 4.30 mm d^{-1} ,相对于 Penman 公式计算结果 4.10 mm d^{-1} 的偏差为 2.38% ,表明二者计算结果接近。

对于水体而言,SEBAL 存在低估可能,但是由于水体占研究区比例极为低下,因此不予讨论。对于不同土地利用计算结果,由于缺少实测资料,因此只能对结果进行定性分析。

计算结果表明,坝地蒸腾蒸发量最高,由于坝地土壤含水率最高,根据实测,坝地 $0 \sim 50 \text{ cm}$ 内平均含水率为 12% 左右,供水充足,导致坝地蒸腾蒸发量较大。果园和林地蒸腾蒸发量居坝地之后,由于果园和林地虽然植被高大,但是绥德地区果园和林地植被一般较为稀疏,因此,蒸腾蒸发量稍低。坡耕地和梯田植被稀疏、土壤含水率较低,约为 7% ,供水不足,因此,其蒸腾蒸发量较小。

据陈强等^[23]研究,SEBAL 对风速、空气温度、“热点”温度等参数的敏感性由大到小排序为风速 > 空气温度 > “热点”温度。因此,模型计算

中首先尽量保证风速、气温达到足够精度,由于韭园沟面积较小,因此,风速和气温的空间变异性较小,同时,本研究选择较大面积的绥德县城为“热点”,选择韭园沟主沟道面积较大的芦苇地作为“冷点”,尽最大可能的保证“冷热点”选择的准确性,这在一定程度上也保证了计算结果的精度。

综上所述,SEBAL 模型的计算结果是较为可信的,用来估算区域的蒸腾蒸发量是可行的,基于 SEBAL 模型得出的结论较为可信。

3 结 论

1) SEBAL 模型物理概念清楚,所需气象参数较少,是对流域 ET 进行监测的有效手段,并被众多案例证明是有效的,得到了较为广泛的应用。

2) 根据对比韭园沟和裴家茆流域不同季节 NDVI 值发现,裴家茆流域 8 月份 NDVI 比例最大值出现在 $0.4 \sim 0.5$ 之间,而不是韭园沟的 $0.5 \sim 0.6$ 之间,同时,裴家茆流域 NDVI 分布特征与韭园沟相比,出现了“马太效应”,即,不同月份特定范围的比例出现了聚集现象,而不同于韭园沟流域的不同月份内分布较为均匀的特点。

3) 研究发现,日蒸腾蒸发量坝地 > 果园及林地 > 草地 > 梯田 > 坡耕地,韭园沟流域梯田比例的增加,是其蒸腾蒸发量略小于裴家茆流域的主

要原因。

4) 作者从多个角度对计算结果的合理性进行了分析,表明 SEBAL 模型估算的流域蒸散发是可信的。

参考文献

- [1] 张仁华. 实验遥感模型及地面基础. 北京: 科学出版社, 1996. Zhang R H. Experimental Remote Sensing Model and Ground Foundation(In Chinese) . Beijing: Science Press ,1996
- [2] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1996. Liu J Y. Resources and environment remote sensing of macroexamination and dynamic study in China(In Chinese) . Beijing: China Science and Technology Press ,1996
- [3] 胡继超 张佳宝 冯杰. 蒸散的测定和模拟计算研究进展. 土壤 2004 ,36(5) : 492—497. Hu J C , Zhang J B , Feng J. Measurement and estimation of evapotranspiration(In Chinese) . Soils. 2004 ,36(5) : 492—497
- [4] 汪潇 张增祥 赵晓丽, 等. 遥感监测土壤水分研究综述. 土壤学报 2007 44(1) : 157—163. Wang X , Zhang Z X , Zhao X L , et al. A review of researches on monitoring of soil moisture by remote sensing(In Chinese) . Acta Pedologica Sinica ,2007 , 44(1) : 157—163
- [5] Brown K W , Rosenberg N J. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field. Agronomy Journal ,1973 ,65: 199—209
- [6] Idso S B , Jackson R D , Reginato R J. Estimating evaporation: a technique adaptable to remote sensing. Science , 1975 , 189: 991—992
- [7] Suguin B , Itier B. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. International Journal of Remote Sensing ,1983 ,4(2) : 371—383
- [8] Shuttleworth W J , Gurney R J. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crop. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society , 1990 , 116: 497—519
- [9] Roerink G J , Menenti M. S-SEBI: A simple remote algorithm to estimate the surface energy balance. Physics and Chemistry of the Earth(B) ,2000 ,25(2) : 147—157
- [10] Bastiaanssen W G M , Menenti M , Feddes , R A , et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) : Part 1 Formulation. Journal of Hydrology ,1998 ,212/213: 198—212
- [11] Bastiaanssen W G M , Pelgrum H , Wang J , et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) : Part 2 validation. Journal of Hydrology. 1998 ,212/213: 213—229
- [12] Su Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. Hydrology and Earth System Sciences , 2002 ,6(1) : 85—99
- [13] Bastiaanssen W G M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated gediz basin ,Turkey. Journal of Hydrology , 2000 ,229(1/2) : 87—100
- [14] Bastiaanssen W G M , Ahmad M D , Chemin Y. Satellite Surveillance of evaporative depletion across the indus basin. Water Resources Research 2002 ,38(12) : 1 273—1 282
- [15] Tasumi M , Allen R G , Trezza R , et al. Use of SEBAL to assess the band width of crop coefficient curves in Idaho. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering ,2005 ,131: 94—109
- [16] Wang J , Bastiaanssen W G M , Ma Y , et al. Aggregation of Land Surface Parameters in the oasis-desert systems of northwest China. Hydrologic Process ,1998 ,12(13) : 2 133—2 147
- [17] 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. 水利学报 2008 37(3) : 286—292. Wu B F , Shao J H. Temporal and spatial extension of evapotranspiration estimated from remote sensing(In Chinese) . Journal of Hydraulic Engineering. 2008 ,37(3) : 286—292
- [18] 何长高 董增川 石景元, 等. 水土保持的水文效应分布式模拟. 水科学进展 2009 20(4) : 584—589. He C G , Dong Z C , Shi J Y , et al. Distributed simulation of hydrological response to water and soil conservation measures(In Chinese) . Advances in Water Science. 2009 ,20(4) : 584—589
- [19] Huang Y L , Chen L D , Fu B J , et al. Evapotranspiration and soil moisture balance for vegetative restoration in a gully catchment on the loess plateau , China. Pedosphere ,2005 ,15(4) : 509—517
- [20] Landsat 7 Science Data Users Handbook [M/ol]. http://www.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_htmls/chapter11/chapter11.html ,2003
- [21] Morse A , Tasumi Masahiro , Allen R G , et al. Application of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and streamflow depletion in the bear river basin of Idaho through remote sensing. Final report submitted to the raytheon systems company , earth observation system data and information system project , by Idaho department of water resources and university of Idaho , Idaho ,2000
- [22] van de Griend A A , Owe M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. Int J Rem Sens ,1993 ,14(6) : 1 119—1 131
- [23] 陈强 苟思 严登华, 等. 基于 SEBAL 模型的区域 ET 计算及气象参数敏感性分析. 资源科学 ,2009 ,31(8) : 1 303—1 308. Chen Q , Gou S , Yan D H , et al. The regional ET calculation based on SEBAL model and the sensitivity analysis of meteorological parameters: A case study of Tianjing city (In Chinese) . Resources Science ,2009 ,31(8) : 1 303—1 308

ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATIONS FROM WATERSHEDS UNDER DIFFERENT
WATER AND SOIL CONSERVATION MEASURES USING SEBAL MODEL
—A CASE STUDY OF JIUYUANGOU AND PEIJIAMAO

Gao Haidong¹ Li Zhanbin^{1,2*} Jia Lianlian³ Li Peng²

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(3 Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Xi'an 710021, China)

Abstract Watershed evapotranspiration is an important process of surface water movement. Water and soil conservation measures influence this process by altering properties of the underlying surface. To reveal evapotranspiration characteristics of watersheds different in adoption of water and soil conservation measures, two watersheds, Jiuyuangou and Peijiamao in a hill-gully region of the Loess Plateau, were selected as subjects for estimation of evapotranspiration from different underlying surfaces using the energy balance based SEBAL remote sensing model. Results show that the surface albedo of the study area varied mostly in the range of 0.1 ~ 0.2; the NDVI of the watershed under different water and soil conservation managements displayed different seasonal variation; the net radiation fluctuated in the range of 400 ~ 800 W m⁻², the sensible heat flux of 50 ~ 200 W m⁻², and the soil heat flux of 100 ~ 200 W m⁻²; the daily evapotranspiration of Jiuyuangou, which is better managed in water and soil conservation, is slightly less than that of Peijiamao. Lands different in land use followed the order of check dam > orchard > woodland > grassland > terrace > slope land in daily evapotranspiration. Analysis of rationality of the calculation from various angles suggests that the estimation of watershed evapotranspiration using the SEBAL model is reliable.

Key words Evapotranspiration; SEBAL; Soil and water conservation measures; Jiuyuangou