

基于 TSEB 平行模型的黄土丘陵沟壑区 蒸散发遥感估算

潘竞虎^{1,2}, 刘春雨¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:复杂地形条件下和干旱半干旱植被稀疏条件下的蒸散发遥感估算一直是蒸散发区域遥感估算的难点、热点问题。针对黄土丘陵沟壑区地表起伏、覆被不均一、植被稀疏的特征, 选择陕甘交界区为研究区, 利用 Landsat TM 资料求取地表特征参数和地表能量平衡各参量, 采用 TSEB 平行模型反演出该区域的瞬时土壤蒸发、植被蒸腾和土壤—植被总蒸散发量, 经过尺度转换, 得到日蒸散量; 并利用附加阻抗法和 FAO Penman-Monteith 公式计算实际蒸散发, 对 TSEB 平行模型法遥感估算结果进行了间接精度评价, 比较验证结果表明 TSEB 平行模型法估算的蒸散发结果合理, 精高较高。

关 键 词:蒸散发; TSEB 模型; 遥感; 黄土丘陵沟壑区

中图分类号: P332; TP79

文献标志码: A

文章编号: 1004-0323(2010)02-0183-06

1 引 言

蒸散发包括土壤蒸发和植物蒸腾, 是水圈、大气圈和生物圈水分与能量交换的主要过程, 也是水循环中最重要的分量之一。遥感, 特别是多光谱、多时相卫星遥感技术的发展, 使得能够获取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参数空间分布的信息成为可能^[1]。蒸散发的遥感估算目前主要集中在单层模型上, 单层模型不区分土壤和植被, 把地表视为一张大叶与外界进行水分和能量的交换, 但实际的下垫面并非单一均匀组成, 从而造成误差, 同时模型中计算潜热通量的表面阻抗也不易获取^[2]。1995 年 Norman^[3]等提出了双源遥感蒸散发模型, 后经 Anderson^[4]等的完善, 称为 TSEB(Two-source Energy Balance)模型。双源蒸散发模型克服了单层模型的局限, 近年来受到人们的重视。双源模型分为串联(Series)模型和平行(Parallel)模型。在串联模型下, 土壤和植被冠层通量共同影响冠层内部的微气象特性, 并且这些微气象特性又反作用于土壤和植被冠层通量; 而平行模

型对其进行了简化, 不考虑土壤和冠层通量之间的交互作用。从理论上说, 串联模型对系统的微气象描述可能更加精确, 但在植被稀疏且分布不均匀时, 地表蒸发与冠层蒸腾在中等风速下只有微弱的耦合关系, 平行模式的阻抗网络方式与系列模式的阻抗网络方式是难以区分的, 用平行假设可以使方程更易求解^[3]。同时, Li^[5]等的研究也表明两种模式具有相似的计算结果, 并表现出相近的计算精度。

黄土丘陵沟壑区地形支离破碎、土壤侵蚀严重, 是我国乃至全球水土流失最为严重的地区。合理准确地估算蒸散发, 对了解区域范围内水分循环和能量平衡, 正确评估气候和人类活动对生态系统的影响具有重要意义。目前的双源平行模型大多未考虑地表起伏对太阳短波辐射和地表长波辐射的影响, 这在一定程度上影响了复杂地形条件下蒸散发的遥感估算精度^[6]。同时原模型中地表参数的算法或者过于繁琐, 或者不适合于研究区地表覆被特征。为此, 本文选择地表起伏大、植被较稀疏、水土流失严重的甘肃省与陕西省宝鸡交界区域作为研究区, 利

收稿日期: 2009-10-29; 修订日期: 2010-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(40961026); 甘肃省自然科学基金项目(0710RJZA104); 西北师范大学知识与科技创新工程项目(NWNU-KJXCXC-03-60)。

作者简介: 潘竞虎(1974—), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为环境遥感与 GIS 应用。E-mail: panjh_nwnu@nwnu.edu.cn。

用修改后的 TSEB 平行模型,计算了土壤蒸发、植被蒸腾和土壤—植被总蒸散发,最后利用附加阻抗法计算实际蒸散发的方法对遥感估算结果进行了间接精度评价,为相同区域蒸散发遥感反演提供案例参考。

2 研究区域与数据来源

研究区属黄土丘陵沟壑区第三副区,地表起伏大,人口较密集,土地垦殖率较高,植被较稀疏,生态环境脆弱,水土流失严重。行政区划上甘肃省平凉市、天水市和陕西省宝鸡市。遥感影像采用 2007 年 9 月 20 日获取的 Landsat5 TM 数据,轨道号为 128-36,太阳高度角为 51.13° ,方位角为 144.46° ,数据记录格式为 GeoTIF,产品级别为正射校正,影像无云层覆盖,中心位置为 $107^\circ18'7''\text{E}$ 、 $34^\circ35'52''\text{N}$,空间分辨率为 30 m;DEM 空间分辨率为 60 m,通过三次卷积法重采样到 30 m 空间分辨率;气象数据主要包括气温、风速等。

数据预处理主要包括大气校正、地形校正和地表真实温度的反演。采用“6S”大气校正模型对研究区遥感影像进行大气校正,以消除大气对地表反射率的影响。在重采样后的 DEM 支持下,使用 CIVCO 地形校正方法^[7],进行研究区遥感影像的地形校正,以消除地形起伏对地表反射率的影响。地表温度的反演采用单窗算法,限于篇幅,略去具体过程,可参考文献[8]。

3 TSEB 平行模型

3.1 模型基础

TSEB 模型基于能量平衡方程,与单层模型不同,在 TSEB 模型中,地表不被假设为单一、均匀的物质体,而将土壤和植被区别对待逐一计算,能量平衡关系分别表示为^[3]:

$$R_{ns} = H_s + L_{es} + G \quad (1)$$

$$R_{nc} = H_c + L_{ec} \quad (2)$$

其中: R_{ns} 和 R_{nc} 分别表示土壤净辐射和植被净辐射, H_s 和 H_c 分别表示来自于土壤和植被冠层的感热, L_{es} 和 L_{ec} 分别表示来自于土壤和植被冠层的潜热, G 为土壤热通量。

3.2 能量分量的确定

3.2.1 净辐射

净辐射是入射和出射的所有长波辐射与短波辐射之差。 R_{ns} 和 R_{nc} 分别用下式计算^[9]:

$$R_{ns} = R_n \exp(-k \cdot \text{LAI} / \sqrt{2\cos\theta}) \quad (3)$$

$$R_{nc} = R_n [1 - \exp(-k \cdot \text{LAI} / \sqrt{2\cos\theta})] \quad (4)$$

其中: LAI 为叶面积指数,可通过与 NDVI 的关系获得^[10]:

$$\text{LAI} = -4.933 - 86.28 \ln(1 - \text{NDVI}) \quad (5)$$

其中: θ 为太阳天顶角,当 θ 较小时,取 $k = 0.6$ ^[9]; R_n 为总净辐射,由式(6)计算^[11]:

$$R_n = R_s \downarrow - R_s \uparrow + R_l \downarrow - R_l \uparrow - (1 - \epsilon_0) R_l \downarrow \\ = (1 - \alpha) R_s \downarrow + R_{ln} \quad (6)$$

其中: $R_s \downarrow$ 和 $R_s \uparrow$ 分别表示入射和出射短波辐射, $R_l \downarrow$ 和 $R_l \uparrow$ 分别表示入射和出射长波辐射, ϵ_0 为地表比辐射率, R_{ln} 为净长波辐射, α 为地表反照率,计算式为^[12]:

$$\alpha = (0.356 \cdot \alpha_1 + 0.13 \cdot \alpha_3 + 0.373 \cdot \alpha_4 \\ + 0.085 \cdot \alpha_5 + 0.072 \cdot \alpha_7) / 255 - 0.0018 \quad (7)$$

3.2.2 土壤热通量

土壤热通量是地表能量与土壤的热交换量。有植被覆盖时计算式为^[13]:

$$G = \frac{T_s - 273.16}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) \\ (1 - 0.98\text{NDVI}^4) R_n \quad (8)$$

其中: T_s 为土壤表面热动力学温度;裸土时, $G = 0.2R_n$ 。

3.2.3 感热通量

地表感热通量是土壤感热通量 H_s 与植被感热通量 H_c 之和,计算公式为^[14]:

$$H_s = \rho_a \cdot C_p [(T_s - T_a) / (\gamma_s + \gamma_{ah})] \quad (9)$$

$$H_c = \rho_a \cdot C_p [(T_c - T_a) / \gamma_{ah}] \quad (10)$$

其中: T_c 为植被冠层温度(K), T_a 为参考高度处的空气温度(K), γ_s 表示来自于土壤热传输的空气动力学阻抗, γ_{ah} 表示土壤与植被冠层间空气层的动力学阻抗, $\rho_a C_p$ 为空气的体积热容量,通常取常数 $1\,205\text{ W} \cdot \text{s} / (\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。

组分温度 T_c 、 T_s 和遥感反演的地表温度 T_r 之间有如下关系^[11]:

$$T_r \approx f_c(\Phi) T_c + [1 - f_c(\Phi)] T_s \quad (11)$$

其中: $f_c(\Phi)$ 为传感器观测视场内植被组分的面积比。

3.2.4 潜热通量

植被冠层潜热通量初值计算式为^[15]:

$$L_{ec} = a_{PT} f_G [\Delta / (\Delta + \gamma)] \cdot R_{ns} \quad (12)$$

其中: a_{PT} 为 Priestley-taylor 参数,其值为 1.26; f_G 是绿叶面积占总叶面积指数的部分(无量纲); γ 为干湿球常数(约为 66 Pa/K); Δ 为饱和水汽压—温度曲线在 T_c 的斜率。根据公式(10)、(11)和(12),植被冠层感热 H_c 可表示为:

$$H_c = \{1 - a_{PT} f_G [\Delta / (\Delta + \gamma)]\} \cdot R_{ns} \quad (13)$$

根据公式(13)可计算出 T_c 的初始值,然后利用公式(11)求出 T_s 。上述迭代过程涉及公式(1)、(2)、(9)、(10)、(11)、(12) 和(13) 等 7 个方程,这些方程之间通过不断的参数传递和循环往复计算,当计算的蒸散发为非负值时,即停止迭代计算,最终即可求得蒸散发值。

3.3 复杂地形条件下的净辐射

3.3.1 短波辐射计算

复杂地形地表接收到的太阳辐射主要包括太阳直接辐射、天空散射辐射和来自于附近地表的反射辐射。用公式可表示为^[6,16]:

$$R_s \downarrow = \Phi \cdot \cos i \cdot T \downarrow (\lambda, \theta) + E_{\text{gdm}} (\lambda) \cdot \{ [E_{\text{gb}} (\lambda) / E_0 (\lambda)] \cdot (\cos i / \cos \theta) + [1 - E_{\text{gb}} (\lambda) / E_0 (\lambda)] \cdot V_d \} + V_t \cdot \alpha_{\text{mean}} \cdot [E_{\text{gb}} (\lambda) + E_{\text{gd}} (\lambda)] \quad (14)$$

其中: $R_s \downarrow$ 为太阳辐射, i 为太阳入射角, Φ 是遮蔽

$$\gamma_{ah} = \frac{\left[\ln \left(\frac{z - d_0}{z_{om}} \right) - \psi_h \left(\frac{z - d_0}{L} \right) + \psi_h \left(\frac{z_{oh}}{L} \right) \right] \left[\left(\frac{z - d_0}{z_{om}} \right) - \psi_m \left(\frac{z - d_0}{L} \right) + \psi_m \left(\frac{z_{oh}}{L} \right) \right]}{k^2 u} \quad (16)$$

其中: z 是参考高度(风速、湿度观测高度为 2 m), u 为 z 高度处的风速(m/s), d_0 为零平面位移, k 为 von Kármán 常数($k = 0.4$), z_{om} 和 z_{oh} 分别表示动量传输和热量传输粗糙度, ψ_m 和 ψ_h 分别表示动量和热量的稳定度校正项。 d_0 和 z_{om} 根据植被高度和叶面积指数计算^[19]; z_{oh} 在 z_{om} 的基础上计算^[20]:

$$z_{oh} = z_{om} / \exp(kB^{-1}) \quad (17)$$

其中: kB^{-1} 为热输送附加阻尼; L 为 Obukhov 稳定度长度; ψ_m 和 ψ_h 在不稳定条件下采用 Businger-dyer 方程计算,稳定条件下采用 Richardson 数计算^[21]。

土壤表面的空气动力学阻抗 γ_s (s/m) 采用下式^[22] 计算:

$$\gamma_s = \frac{h_c \exp(\beta)}{\beta K_h} \left[\exp \left(\frac{-\beta z_{om}}{h_c} \right) - \exp \left[\frac{-\beta(d_0 + Z_{om})}{h_c} \right] \right] \quad (18)$$

其中: K_h 表示冠层顶处涡流扩散特性, β 表示冠层内涡流扩散与风速的阻尼系数, h_c 为植被高度。

利用 ERDAS 软件的空间建模工具 Model maker 完成上述运算,获得瞬时的潜热通量。通过时间尺度扩展得到一天的蒸散量 ET_{24} :

$$ET_{24} = \frac{R_{n24} \times \Delta_{24} \times 86\,400}{2.501 - 0.002361 \times (T_r - 273.16) \times 10^6} \quad (19)$$

其中: R_{n24} 是一天内的净辐射^[23], Δ_{24} 是一天内的蒸发比。

模型运算的技术流程如图 1 所示。

因子, $E_0(\lambda)$ 为天文太阳辐照度, θ 为太阳天顶角; $T \downarrow (\lambda, \theta)$ 为直射光下行辐射透过率; $E_{\text{gdm}}(\lambda)$ 为水平地表时的天空散射光谱辐照度,采用 Modtran 进行模拟计算; V_d 为天空观测因子, V_t 为地形观测因子,在复杂地形地区采用 Dozier 和 Frew^[17] 提出的解析法计算; α_{mean} 为邻近地表平均反照率,采用 9×9 滤波窗口,将大气校正和地形校正后计算获得的地表反照率作均值滤波后获得。

3.3.2 长波辐射计算

净长波辐射 R_{ln} 由下式计算^[18]:

$$R_{\text{ln}} = \epsilon_0 [\epsilon_a \sigma T_a^4 V_d + \epsilon'_0 \sigma T_r'^4 (1 - V_d)] - \epsilon_0 \sigma T_r^4 \quad (15)$$

其中: ϵ_0 和 ϵ_a 分别为地表和空气的比辐射率, ϵ'_0 为临近地表的平均比辐射率, σ 为 Stefan-boltzman 常数,取值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K}^4)$,其它参数同前。

3.4 热传输空气动力学阻抗

冠层有效高度与参考高度间的热传输阻抗 γ_{ah} (s/m) 采用下式^[10] 计算:

4 结果与分析

4.1 瞬时蒸散发计算结果比较评价

由于缺乏通量观测数据,无法直接对地表通量和蒸散发遥感估算结果精度进行直接验证,本文采用间接方法进行精度比较评价。

4.1.1 附加阻抗法

为在数值上比较 TSEB 遥感模型估算的蒸散发与附加阻抗法^[6,24] 估算的蒸散发结果,在 ArcView 的 point analyst 支持下,在两个图层对应位置随机采样 3 000 个点,随机样点均匀分布于整幅遥感影像。根据这两种方法计算的蒸散发数值,建立两者的散点图,并进行线性拟合,拟合决定性系数为 0.928,拟合直线的坡度为 1.151,非常接近于 1,进一步的相关分析发现两者的相关系数达到了 0.953,相关性较高,说明结果合理可信。

4.1.2 FAO 法

利用联合国粮农组织(FAO)1988 年推荐使用的 Penman-monteith 公式计算出参考作物的蒸散量,然后利用作物系数得出作物实际的蒸散量。对研究区的农田(玉米)、裸地和林地进行了检验,根据 FAO 推荐的作物系数及相关文献^[25],取农作物作物系数为 1.15,裸地为 0.8,林地为 1.08。检验结果如表 1 所示。

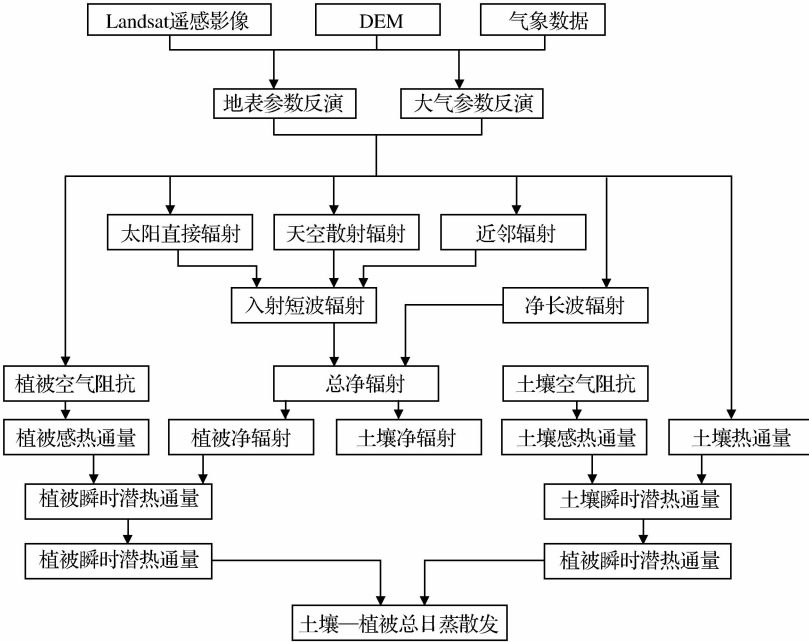


图 1 模型运算的技术流程

Fig. 1 Flowchart of TSEB model operation

表 1 遥感估算区域蒸发与 FAO 方法值对比

Table 1 Comparison of FAO's evapotranspiration with the estimation of remote sensing model

地表覆盖 状况	TSEB 遥感估算值 /mm	P-M 公式计算值 /mm	相对偏差 /%
农田	5.165	5.795	12.20
林地	5.969	6.212	4.07
裸地	3.302	3.957	19.84

4.2 瞬时能量平衡因子统计分布

经统计(表 2),地表净辐射介于 323.361~1 111.637 W/m²间,平均值为 827.303 W/m²,整体上呈正态分布特征,数值大小主要介于 750~9 000 W/m²之间。土壤净辐射和植被净辐射平均值分别为 515.551 W/m²和 311.753 W/m²,其中土壤净辐射主要分布于 310~720 W/m²间,植被净辐射主要分布于 170~430 W/m²间;同时,土壤净辐射随着植被覆盖度的增加而相应减少,植被净辐射随着植被覆盖度的增加而相应增加。土壤热通量的值介于 13.815~56.592 W/m²之间,平均值为 32.266 W/m²,数值大小主要介于 25~40 W/m²之间,植被覆盖度越高,土壤热通量越小。植被冠层感热通量介于 0~623.261 W/m²之间,平均值约为 347.684 W/m²,数值大小主要分布于 290~800 W/m²之间;土壤感热通量在 -185.594~539.493 W/m²之间,平均值为 288.367 W/m²。植被冠层的潜热通量介于 0~712.454 W/m²之间,平

均值大约为 151.929 W/m²;土壤潜热通量介于 0~605.810 W/m²之间,平均值约为 318.652 W/m²;土壤植被总潜热通量介于 0~912.454 W/m²之间,平均值约为 451.393 W/m²,整体上呈偏正态分布特征,数值大小主要介于 220~680 W/m²之间,植被覆盖度越高,总潜热通量越大。

表 2 瞬时能量平衡因子统计值

Table 2 Statistic value of instantaneous energy balance factor

因子	最小值	最大值	平均值	标准差
R_n	323.361	1 111.637	827.303	126.215
R_{nc}	169.076	900.907	515.551	102.053
R_{ns}	53.345	852.233	311.753	89.166
G	13.815	56.592	32.266	11.684
H_c	0	623.261	347.684	107.880
H_s	-185.594	539.493	288.367	72.381
L_{ec}	0	712.454	151.929	62.035
L_{es}	0	605.810	318.652	100.387
L_e	0	912.454	451.393	143.4379

4.3 日蒸散发的空间分布

日蒸散发的空间分布如图 2 所示。经统计,植被冠层日瞬时蒸散发介于 0~8.502 mm 之间,平均值约为 3.964 mm;土壤瞬时蒸散发介于 0~4.519 mm 之间,平均值约为 1.941 mm;土壤-植被总瞬时蒸散发介于 0~9.526 mm 之间,平均值约为 5.912 mm,数值大小主要介于 3.5~5.5 mm 之间。与潜热变化一致,植被覆盖度越高,总潜热通量越大。

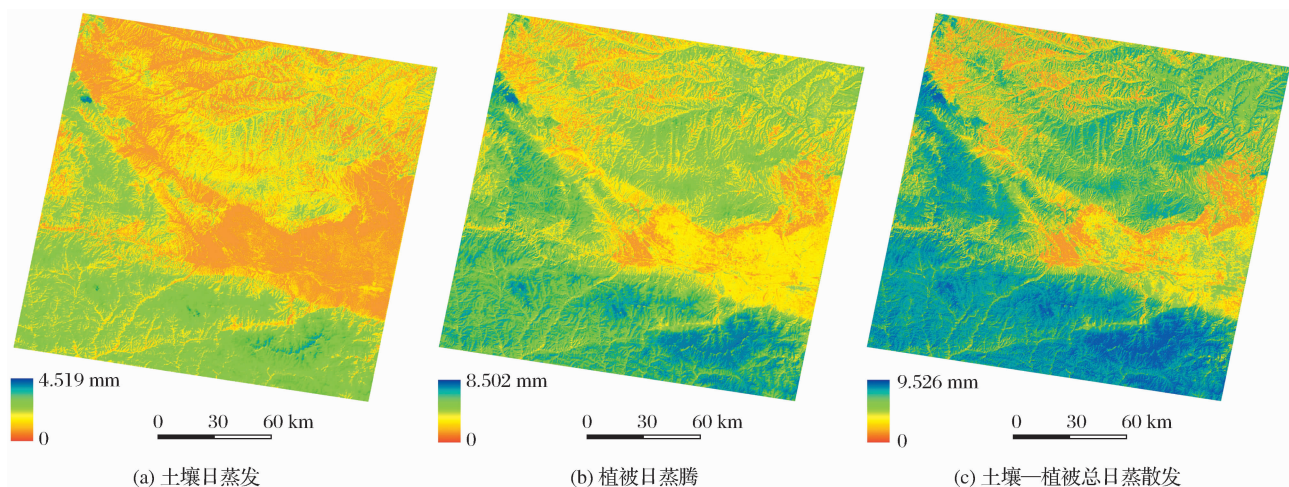


图2 土壤日蒸发、植被日蒸腾和土壤—植被系统总日蒸散发空间分布

Fig.2 Spatial distribution of daily soil evaporation, daily vegetation transpiration and daily evapotranspiration from canopy-soil system

5 结 语

本文运用 Landsat-5 TM 资料,利用一种可操作的地表蒸散发遥感反演双源模型 TSEB,通过反演域瞬时蒸散值,经过时间尺度转换,得到区域日蒸散值,并以陕甘交界黄土丘陵沟壑区为例,进行了土壤蒸发和植被蒸腾的定量估算,实现了土壤蒸发和植被蒸腾信息的独立监测。结果表明反演的日蒸散值与实际地表状况吻合,能很好地反映研究区地表实际情况,取得了较好的估算精度,不仅对于更深入、更细致地研究地气交换过程,更准确地揭示地表蒸散规律具有重要作用,而且对开展基于地表蒸散的水资源管理、农业旱情监测和预警等应用研究也具有一定价值。

复杂地形条件下的蒸散发遥感估算和干旱半干旱植被稀疏条件下的蒸散发遥感估算一直是蒸散发区域遥感估算的难点热点问题,本文只是对这一问题进行了初步的尝试。由于蒸散发的遥感反演是一个较复杂的过程,仍有许多问题需要更深入地研究和探讨。如模型输入需要的非遥感参数的准确计算和空间扩展;模型的准确地面验证,模型中较多参量均通过经验方法求得,这些方法在具体区域的适用性等,需进一步分析;另外,反演的方法和气象资料的尺度转换也会产生一些误差。对蒸散发估算精度进行参数敏感性分析,有利于进一步发现敏感因子,从而有针对性的解决问题,进而提高蒸散发估算的精度^[6];此外,未来需从不同角度深入分析不同地形复杂程度下地表能量通量不考虑地形因素可能产生的误差,总结得出复杂地形下的分布和变异规律,但这些并不影响本文的参考意义。

参考文献:

- [1] Zhou Jian, Cheng Guodong, Li Xin, *et al.* Application of Remote Sensing Technology to Estimate River Basin Evapotranspiration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 679-686. [周剑,程国栋,李新,等.应用遥感技术反演流域尺度的蒸散发[J].水利学报,2009,40(6):679-686.]
- [2] Yi Yonghong, Yang Dawen, Liu Yu, *et al.* Review of Study on Regional Evapotranspiration Modeling Based on Remote Sensing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(9): 1118-1124. [易永红,杨大文,刘钰,等.区域蒸散发遥感模型研究的进展[J].水利学报,2008,39(9):1118-1124.]
- [3] 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): 263-293.
- [4] Murray T, Verhoef A. Moving towards a More Mechanistic Approach in the Determination of Soil Heat Flux from Remote Measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 147(1): 80-97.
- [5] Li F, Kustas W P, Prueger J H, *et al.* Utility of Remote Sensing Based Two-source Energy Balance Model under Low and High Vegetation Cover Conditions[J]. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(6): 878-891.
- [6] Zhang Wanchang, Gao Yongnian. Estimation of Regional Evapotranspiration Using Two Source Energy Balance Model and ETM+ Imagery[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(4): 523-528. [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.]
- [7] Qin Chun, Wang Jian. Improved CIVCO Topographic Correction Model and Application[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(1): 82-87. [秦春,王建. CIVCO 地形校正模型的改进及其应用[J].遥感技术与应用,2008,23(1):82-87.]
- [8] Pan Jinghu, Feng Zhaodong, Xiang Denian, *et al.* Analysis on Thermal Environment Effect of Land Use Type and Pattern in Valley City—A Case Study of Lanzhou City[J]. Remote Sens-

- ing Technology and Application, 2008, 23(2): 202-207. [潘竟虎, 冯兆东, 相得年, 等. 河谷型城市土地利用类型及格局的热环境效应遥感分析[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(2): 202-207.]
- [9] Zheng Yuanrun, Zhou Guangsheng. A Forest Vegetation NPP Model Based on NDVI[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2000, 23(1): 9-12. [郑元润, 周广胜. 基于 NDVI 的中国天然森林植被净第一性生产力模型[J]. 植物生态学报, 2000, 23(1): 9-12.]
- [10] Kustas W P, Norman J M. Evaluation of Soil and Vegetation Heat Flux Predictions Using a Simple Two-source Model with Radiometric Temperatures for Partial Canopy Cover[J]. Agric. for. Meteorol., 1999, 94(1): 13-29.
- [11] Anderson M C, Norman J M, Diak G R, *et al.* A Two-source Time-integrated Model for Estimating Surface Fluxes from Thermal Infrared Satellite Observations[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 60(2): 195-216.
- [12] Liang S L. Narrowband to Broadband Conversions of Land Surface Albedo: I. Algorithms[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 76(2): 213-238.
- [13] Bastiaanssen W G M. SEBAL-based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey[J]. Journal of Hydrology, 2000, 229(1): 87-101.
- [14] Liu Yani, Wu Jianjun, Xia Hong, *et al.* Summary of Two-layer Models on Estimating Evapotranspiration Using Quantitative Parameters Derived from Remote Sensing[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(1): 65-71. [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.]
- [15] Priestly C H B, Taylor R J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-scale Parameters. Mon[J]. Weather Rev., 1972, 100: 81-92.
- [16] Hansen L B, Kamstrup N, Hansen B U. Estimation of Net Short-wave Radiation by the Use of Remote Sensing and a Digital Elevation Model—A Case Study of a High Arctic Mountainous Area[J]. Int. J. Remote Sen., 2002, 23(21): 4699-4718.
- [17] Dozier H, Frew J. Rapid Calculation of Terrain Parameters for Radiation Modeling from Digital Elevation Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(5): 963-969.
- [18] Liang S L. Narrow Band to Broad Band Conversions of Land Surface Albedo: I Algorithms[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 76(2): 213-238.
- [19] Pan Jinghu, Liu Chunyu. Retrieving Evapotranspiration of Small Watershed in Loess Hilly-gully Region Based on Remote Sensing Image: Taking Weigou Watershed as a Case Study[J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2008, 44(5): 88-93. [潘竟虎, 刘春雨. 黄土丘陵沟壑区小流域蒸散发的遥感估算[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2008, 44(5): 88-93.]
- [20] Su Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) of Estimation of Turbulent Heat Fluxes[J]. Hydrology and Earth System Science, 2002, 6(1): 85-99.
- [21] Businger J A. A Note on the Businger-dyer Profiles[J]. Boundary-layer Meteorology, 1988, 42(1-2): 145-151.
- [22] Biftu G F, Gan T Y. A Semi-distributed, Physics-based Hydrologic Model Using Remotely Sensed and Digital Terrain Elevation Data for Semi-arid Catchments[J]. Int. J. Remote Sen., 2004, 25(20): 4351-4379.
- [23] De Bruin H A R. From Penman to Makkink[C]//Proceedings and Information: TNO Committee on Hydrological Research, Gravenhage, the Netherlands, 1987, 39: 5-31.
- [24] Li F Q, Lyons T J. Remote Estimation of Regional Evapotranspiration[J]. Environ. Model. & Softw., 2002, 17(1): 61-75.

Retrieving Evapotranspiration of Loess Hilly-gully Region Using TSEB Parallel Model Based on Remote Sensing Image

PAN Jing-hu^{1,2}, LIU Chun-yu¹

(1. College of Geographic and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;
2. College of Resource and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Evapotranspiration retrievals in conditions of rugged terrain and arid/semiarid sparse vegetation are always the hotspot in estimation of regional evapotranspiration from remote sensing images. Concerning with the complex characteristics of the loess hilly-gully region, such as undulating topography, un-unique land use/covers and less vegetated land surface, etc, land surface characteristic parameters and flux was retrieved, and the instantaneous vegetation transpiration and soil evaporation was estimated with the TSEB parallel model by using the Landsat TM data for an experimental study site located on the conjuncture area of Shaanxi and Gansu where the terrain surface is very undulating with less vegetation developed, heavy soil and water loss loess plateau. And then the calculated result was merged into daily evapotranspiration, also the spatial pattern of the daily evapotranspiration was analyzed. Actual evapotranspiration of the study area was calculated with the extra resistance method and Penman-Monteith equation to compare with the TSEB parallel model estimated, which suggested that the TSEB parallel model can be used for the accurate estimation of evapotranspiration in loess hilly-gully region.

Key words: Evapotranspiration; TSEB model; Remote sensing; Loess hilly-gully region