

谐波法与双源模型耦合估算土壤热通量和地表蒸散发

杨红娟¹ 丛振涛¹ 雷志栋¹

(1 清华大学水利水电工程系水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京市海淀区清华园 1 号,100084)

摘 要:尝试将谐波法和双源遥感模型 TSEB 耦合起来模拟表层土壤含水率,并利用两个稀疏植被站点的数据进行了检验。结果表明,当 TSEB 模型模拟的显热通量误差较大时,耦合方法模拟的表层土壤含水率误差也较大,进而使得土壤热通量与实测值的偏差较大。但是由于土壤热通量分担了部分显热通量的估算误差,潜热通量的模拟精度明显提高,土壤组分对地表总潜热通量的贡献越大,这种提高越显著。

关键词:土壤热通量;谐波法;蒸散发;遥感;TSEB

中图法分类号:P237.9

目前,应用比较广泛的遥感蒸散发算法是能量平衡余项法^[1],土壤热通量 G 为能量平衡方程中的一项,对于裸地和稀疏植被,该项占净辐射 R_n 的 20%~50%^[2],与潜热通量 LE 、显热通量 H 所占的比例相当,因此,其估算精度对蒸散发的反演精度有显著的影响。

遥感蒸散发模型中,通常用 R_n 的一定比例来估算 G ,比值 G/R_n 为植被指数的函数^[3](以下称为简单比例法),该方法没有考虑土壤湿度对 G/R_n 的影响^[2]。Murray 等^[4]提出利用谐波法来估算土壤热通量,该方法物理性强,综合考虑了植被、土壤质地、水分对热通量的影响。谐波法需要表层土壤含水率作为输入参数,该参数可通过微波遥感反演得到,但是微波数据的空间分辨率(一般大于 10 km)远低于热红外数据(常用的 MODIS 传感器为 1 km^[5]),所以如果利用微波反演的地表水分作为谐波法的输入参数,由此得到的土壤热通量与利用热红外数据估算的显热通量在空间尺度上不匹配。1995 年,Norman 等提出了双源遥感蒸散发模型^[3],后经 Anderson 等人^[6]的完善,称为 TSEB(two-source energy balance)模型。本文尝试将谐波法与 TSEB 模型通过表层土壤含水率进行耦合,并由此估算土壤热通量和潜热通量。

1 研究方法

1.1 谐波法

对土壤表面的温度进行谐波分解(即表达为不同周期的三角函数的线性组合),可以对热传导方程进行求解^[7],由此得到土壤热通量的表达式为:

$$G = \Gamma \cdot \sum_{n=1}^M \left[\sqrt{m\omega} A_{0n} \sin(m\omega t + \Phi_{0n} + \pi/4) \right] = \Gamma \cdot J_s \tag{1}$$

式中, Γ 为热惯量(J/(m²·K·s^{1/2})); ω 为地球自转角频率(rad/s); M 为谐波的总阶数; A_{0n} 和 Φ_{0n} 分别为第 n 阶谐波的振幅和相位角; t 为计算时刻(s);为便于表达,谐波项记为 J_s 。

根据 Murray 等^[8]的研究, Γ 可以通过下式进行计算:

$$\Gamma = \exp\{\gamma'[1 - (\theta/\theta_*)^{\gamma'-\delta'}]\}(\Gamma_* - \Gamma_0) + \Gamma_0 \tag{2}$$

式中, θ 为表层土壤含水率(m³/m³); θ_* 为土壤饱和含水率(m³/m³);参数 γ' 和 δ' 与土壤质地有关,通过查表得到; Γ_0 和 Γ_* 分别为土壤干燥和饱和时的热惯量,为 θ_* 的函数。

J_s 是对土壤表面温度进行谐波分析的结果,

Murray 等^[8]发现它与对地表辐射温度 T_r (即土壤和植被的组合温度)进行谐波分析得到的 J_r 之间存在如下关系:

$$J_s = [1 - 0.5f_c]J_r \quad (3)$$

式中, f_c 为植被覆盖度。

1.2 TSEB 模型

TSEB 模型有两种阻抗结构:并联结构和串联结构。TSEB 模型在计算各能量的分量时采用了土壤和植被表面分量之和的形式,与串联结构的物理意义更为吻合^[9],因此,本文采用串联结构。首先根据 Beer 定律计算土壤、植被表面的净辐射,然后计算潜热通量和显热通量。热通量计算步骤如下。

1) 植被组分的潜热和显热

植被表面的潜热通量 LE_c 通过 Priestley-Taylor 公式计算:

$$LE_c = f_g \alpha_{PT} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_{nc} \quad (4)$$

式中, f_g 为叶面积指数中绿色部分所占的比例,难以确定时取 1.0; $\alpha_{PT}=1.3$ 为 P-T 系数; Δ 为饱和和水汽压-温度曲线斜率(kPa/K); γ 为湿度计常数(kPa/K); R_{nc} 为植被表面的净辐射(W/m²)。则植被表面的显热通量 H_c 为:

$$H_c = R_{nc} - LE_c \quad (5)$$

2) 土壤组分的潜热和显热

根据 TSEB 模型的阻抗网络结构,可得:

$$\rho C_p \frac{T_c - T_0}{r_{ac}} = H_c \quad (6)$$

$$\frac{T_s - T_0}{r_{as}} + \frac{T_c - T_0}{r_{ac}} = \frac{T_0 - T_a}{r_a} \quad (7)$$

式中, ρ 为空气密度(kg/m³); $C_p=1\,005$ J/(kg·K) 为空气的定压比热容; T_c 为叶片温度(K); T_0 为动量源(汇)高度的空气动力学温度(K); T_s 为土壤表面温度(K); T_a 为参考高度的气温(K); r_{as} 为土壤表面到冠层内动量源(汇)高度的热量传输阻抗(s/m); r_{ac} 为冠层的边界层阻抗(s/m); r_a 为动量源(汇)高度到参考高度的空气动力学阻抗(s/m)。各阻抗的计算公式可以参考 Norman 等^[3]的描述。

同时,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^[6]:

$$T_r \approx f_c(\Phi)T_c + [1 - f_c(\Phi)]T_s \quad (8)$$

式中, $f_c(\Phi)$ 为传感器观测视场内植被组分的面积比。

因此,通过式(6)、式(7)、式(8)构成的线性方程组可以求解 T_c 、 T_s 和 T_0 ,进而得到土壤表面的

显热通量 H_s 为:

$$H_s = \rho C_p \frac{T_s - T_0}{r_{as}} \quad (9)$$

在 TSEB 模型中,土壤热通量通过简单比例法估算:

$$G = c_g R_{ms} \quad (10)$$

式中, c_g 为比例系数,中午前后几 h 为 0.35,早晨和傍晚略有不同^[10]; R_{ms} 为土壤表面的净辐射(W/m²)。

土壤组分的潜热通量 LE_s 为:

$$LE_s = R_{ms} - H_s - G \quad (11)$$

3) 地表总潜热和总显热

地表总潜热通量和总显热通量为各组分的通量之和:

$$LE = LE_s + LE_c \quad (12)$$

$$H = H_s + H_c \quad (13)$$

1.3 谐波法与 TSEB 模型的耦合

根据 TSEB 模型的阻抗网络结构,土壤表面的潜热通量可以利用水汽压梯度进行计算:

$$LE_s = \frac{\rho C_p}{\gamma} \cdot \frac{h_r e^*(T_s) - e_0}{r_{ss} + r_{as}} \quad (14)$$

式中, $e^*(T_s)$ 为 T_s 对应的饱和水汽压(kPa); e_0 为冠层内动量源(汇)高度的水汽压(kPa); h_r 为土壤表面水汽的饱和度; r_{ss} 为土壤表面水汽扩散阻抗(s/m),可利用 Sellers 等^[11]给出的经验公式估算:

$$r_{ss} = \exp[8.206 - 4.255(\theta/\theta_*)] \quad (15)$$

h_r 与土壤表面的水势相关:

$$h_r = \exp\left(\frac{Mg\psi_s}{RT_s}\right) \quad (16)$$

式中, $M=0.018$ kg/mol 为水汽摩尔质量; $g=9.81$ m/s² 为重力加速度; $R=8.314$ J/(mol·K) 为普适气体常数; ψ_s 为土壤水势,利用水分特征曲线和表层土壤含水率求取:

$$\psi_s = \psi_*(\theta/\theta_*)^{-b} \quad (17)$$

式中, ψ_s (m) 和 b 均为土壤水力学参数,根据土壤质地查表得到^[4]。

由于地表总潜热通量等于各组分潜热通量之和,可以得到:

$$\frac{\rho C_p}{\gamma} \cdot \frac{h_r e^*(T_s) - e_0}{r_{ss} + r_{as}} + LE_c = \frac{\rho C_p}{\gamma} \cdot \frac{e_0 - e_a}{r_a} \quad (18)$$

式中, e_a 为参考高度大气的水汽压(kPa)。

同时,土壤表面需要满足能量平衡:

$$G + LE_s = R_{ms} - H_s \quad (19)$$

当 T_s 、 LE_c 、 R_{ms} 、 H_s 通过 TSEB 模型得到后,式(18)和式(19)构成的方程组中只有两个未知量

θ 和 e_0 , 方程组可解。 G 和 LE_s 都随 θ 单调递增, 因此可以用试算法求解: ① 假设一个初始含水率 θ_0 ; ② 通过式 (2) 计算 Γ , 进而根据式 (1) 计算 G ; ③ 通过式 (18) 计算 e_0 , 进而根据式 (14) 计算 LE_s ; ④ 判断 $G+LE_s$ 与 R_n-H_s 的关系, 若前者大于后者, 说明 $\theta_0>\theta$, 减小 θ_0 , 重新计算; 若前者小于后者, 说明 $\theta_0<\theta$, 增大 θ_0 , 重新计算; 若二者接近 (如差距小于 5 W/m^2), 则停止计算。

2 数据来源

TSEB 模型的输入参数为冠层表面入射和出射的太阳短波辐射通量、大气下行长波辐射通量、地表辐射温度、气温、风速、叶面积指数和冠层高度, 耦合模型与 TSEB 模型相比增加了日内地表温度变化曲线、土壤质地和参考高度水汽压三个参数。

本文采用两个站点的数据进行检验——灌木站点和草地站点。二者均位于美国亚利桑那州的 Walnut Gulch 流域 (中心位置为 $31^{\circ}43'N, 110^{\circ}W$), 1990 年 7 月下旬至 8 月中旬, 美国农业部在该流域开展了一次大规模的机-地同步观测实验 (Monsoon'90 实验)。流域内共设有 8 个地面通量站, 对常规气象要素和地表水热通量进行观测, 观测数据 20 min 存储一次。站点 1 为灌木站点, 下垫面主要为灌木, 叶面积指数为 0.4, 平均冠层高度为 0.27 m。Anderson 等^[6]认为, 由于植被稀疏, 且冠层高度很不均匀, 在阻抗计算中, 冠层高度应取 0.8 m, 本文采用该值, 计算时段为 DOY 216~222。草地站点为站点 5, 下垫面主要为草地, 叶面积指数为 0.8, 平均冠层高度为 0.1 m, 由于夹杂零星灌木, 本文计算中同样按照 Anderson 等^[6]的建议, 冠层高度采用 0.6 m, 计算时段为 DOY 215~221。两站的土壤质地均为砂质壤土。

3 计算结果分析

在阴云条件下, 日内地表温度波动比较剧烈, 这样会带来谐波项 J_r 的波动。为了减小这种波动带来的误差, 本文把两个站点 20 min 的数据合成为 1 h 的数据进行谐波分析和模型计算。早上和傍晚的大气稳定性发生变化, 地表通量模拟较困难, 所以本文计算时只考虑地表净辐射通量大于 200 W/m^2 的时段, 两站点分别有 49 和 48 组数据。

3.1 灌木站点

谐波法和 TSEB 模型耦合后不改变净辐射和

显热通量, 只改变土壤热通量和潜热通量的模拟结果。表 1 列出了耦合前后能量平衡各分量模拟值与测量值的对比结果。可见, R_n 的模拟误差较小, RMSE 为 22 W/m^2 , 该误差一部分来自仪器测量误差, 另一部分来自模型模拟的长波出射误差; 耦合模型模拟的显热通量整体偏小, RMSE 为 40 W/m^2 ; 土壤热通量和潜热通量略微偏大, RMSE 分别为 33 W/m^2 和 41 W/m^2 。

表 1 灌木站点的模拟结果/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Tab. 1 Model Results at the Shrub Site/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

	平均值				RMSE			
	R_n	H	G	LE	R_n	H	G	LE
实测	471	144	139	188				
TSEB	473	130	137	206	22	40	23	73
耦合模型	473	130	148	195	22	40	33	41

耦合模型模拟的 G 的精度低于 TSEB 模型, 这主要源于 H 的模拟值偏低, 为了实现土壤表面的能量平衡, 需要有一个比较高的表层土壤含水率。土壤含水率偏高, 导致热惯量偏大, 进而使谐波法模拟的 G 偏大。图 1(a) 描述了计算期内白天各时刻耦合模型模拟的表层土壤含水率的平均值, 上午时段的模拟值远高于实测 5 cm 埋深处的土壤含水率, 与之对应的是上午时段 H 的模拟误差较大。下午时段, θ 的模拟值逐渐向测量值靠拢, 同时, 显热通量的模拟误差也比较小。耦合模型土壤热通量的模拟结果在 10:00 以前误差较大, RMSE 大于 40 W/m^2 ; 10:00 以后, 模拟误差与 TSEB 模型接近, RMSE 为 20 W/m^2 左右。值得注意的是, 除正午时刻外, 耦合模型的潜热通量的模拟误差在各时刻均小于 TSEB 模型, 这说明土壤热通量分担了一部分显热通量的模拟误差,

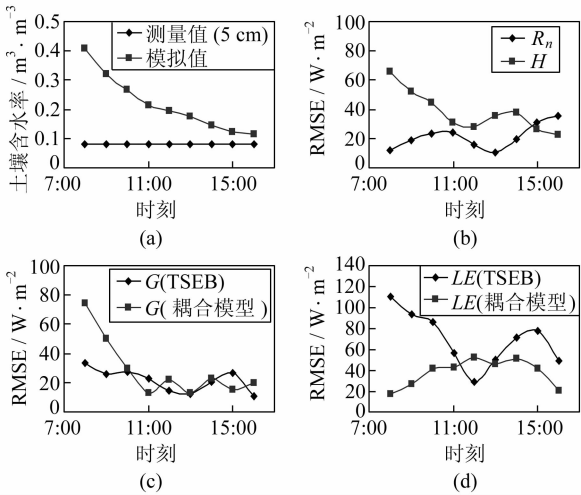


图 1 灌木站点计算期内各时刻的模拟结果
Fig. 1 Model Results for each Hour During the Simulation Period at the Shrub Site

进而提高了潜热通量的模拟精度。

3.2 草地站点

该站点各模型的模拟结果与测量值的对比见表 2。可见,耦合模型模拟的 R_n 值比测量值低 16 W/m^2 , H 值比测量值低 18 W/m^2 , G 值与测量值接近。其对应的 RMSE 与灌木站点类似,但潜热通量的模拟结果要好于灌木站点, RMSE 为 27 W/m^2 。

表 2 草地站点的模拟结果/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

Tab. 2 Model Results at the Grass Site / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$

	平均值				RMSE			
	R_n	H	G	LE	R_n	H	G	LE
实测	488	133	119	236				
TSEB	472	115	115	242	20	40	21	37
耦合模型	472	115	122	235	20	40	38	27

耦合模型模拟的表层土壤含水率与灌木站点类似:上午时段,显热通量的模拟误差较大,因此表层含水率的模拟值远高于埋深 5 cm 处土壤含水率的测量值;下午时段,土壤含水率的模拟值与测量值接近。草地站点耦合模型土壤热通量的模拟误差在各时刻均大于 TSEB 模型,如图 2(a)所示。具体来看,上午时段,由于表层土壤含水率的模拟值偏大,致使土壤热通量的模拟值高于测量值;下午时段,由于地表温度的波动使谐波项 J_r 减小过快,土壤热通量的模拟值低于测量值,如图 2(b)所示。尽管如此,耦合模型潜热通量的模拟误差几乎在各时刻均小于 TSEB 模型。

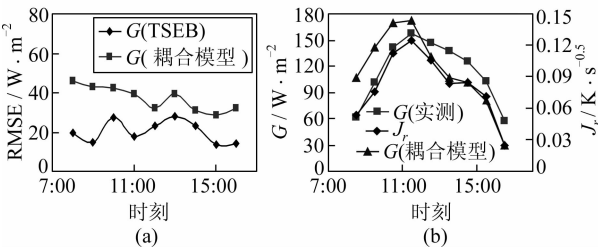


图 2 草地站点计算期内各时刻的模拟结果
Fig. 2 Model Results for Each Hour During the Simulation Period at the Shrub Site

4 结 语

本文尝试将谐波法与 TSEB 模型通过表层土壤含水率耦合起来,旨在提高裸地和稀疏植被土壤热通量的模拟精度,并利用两个稀疏植被站点(灌木、草地)的数据对耦合模型的表现进行了检验。计算结果同时显示谐波法对地表温度的波动比较敏感,但是遥感蒸散发模型中所用的地表辐射温度只能在晴天条件下得到,此时地表温度不

会出现剧烈波动,所以在遥感蒸散发模型可以应用的时刻,谐波法都是适用的。

参 考 文 献

[1] 陈云浩, 李晓兵, 李京, 等. 陆面日蒸发散量计算的两层阻抗遥感模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(12):1 075-1 079

[2] Idso S B, Aase J K, Jackson R D. Net Radiation-soil Heat Flux Relations as Influenced by Soil Water Content Variations [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1975, 9:113-122

[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, 77:263-293

[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, 147:80-97

[5] 闫峰, 覃志豪, 李茂松, 等. 基于 MODIS 数据的上海市热岛效应研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(7):576-580

[6] Anderson M C, Norman J M, Diak G R, et al. A Two-source Time-integrated Model for Estimating Surface Fluxes Using Thermal Infrared Remote Sensing [J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 60:195-216

[7] Horton R, Wierenga P J. Estimating the Soil Heat Flux from Observation of Soil Temperature Near the Surface [J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47:14-20

[8] Murray T, Verhoef A. Moving Towards a More Mechanistic Approach in the Determination of Soil Heat Flux from Remote Measurements II. Diurnal Shape of Soil Heat Flux [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 147:88-97

[9] Lhomme J P, Chehbouni A. Comments About the Basic Equations of Dual-source Vegetation-atmosphere Transfer Models [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 94:269-273

[10] Kustas W P, Zhan X, Schmugge T J. Combining Optical and Microwave Remote Sensing for Mapping Energy Fluxes in a Semiarid Watershed [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 64: 116-131

[11] Sellers P J, Heiser M D, Hall F G. Relations Between Surface Conductance and Spectral Vegetation Indices at Intermediate ($100\text{ m}^2\text{-}15\text{ km}^2$) Length Scales [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D17):19 033-19 059

E-mail: yanghj@mails.tsinghua.edu.cn

第一作者简介:杨红娟,博士生。主要研究方向为遥感在水文水

Coupling of the Harmonic Analysis Method and Two-Source Energy Model to Estimate Soil Heat Flux and Evapotranspiration

YANG Hongjuan¹ CONG Zhentao¹ LEI Zhidong¹

(1 State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, 1 Qinghuayuan, Haidian District, Beijing 100084, China)

Abstract: A harmonic analysis method was coupled with the two-source energy balance (TSEB) model in this paper. The coupled method was tested. When the difference between modeled sensible heat flux and observations is large, there is obvious bias with the simulated soil surface water content leading errors with the simulated soil heat flux. At the same time, estimated latent heat flux by the coupled model is improved compared with that of TSEB model. With the proportion of soil evaporation to the total evapotranspiration becoming larger, the improvement becomes more notable.

Key words: soil heat flux; harmonic analysis; evapotranspiration; remote sensing; TSEB

About the first author: YANG Hongjuan, Ph. D candidate, majors in the application of RS in hydrology and water resources management.
E-mail: yanghj@mails.tsinghua.edu.cn

2008 年 PK 收录《武汉大学学报·信息科学版》情况

(公布名单为第一作者)

2002 年

第2期 梅文胜 孙海燕 第5期 吴 浩 第6期 张学庄 张永军 柳宗伟 金双根 沈云中 胡 鹏
高文秀

2003 年

第 1 期 宁津生 第 4 期 王新洲 邱卫宁 第 5 期 陶本藻 孙海燕 曾文宪 游扬声 第 6 期 杨元喜
施一民 徐天河

2004 年

第3期	邹贤才	第4期	张祖勋	关泽群	林宗坚	梅天灿	刘良明	倪玲	李均力	舒宁	管玉娟
第7期	罗红霞	王树良	第8期	鄢俊浩	杨文	第9期	何春阳	苏俊英	第10期	徐涵秋	

2005 年

第4期	宋 鹰	第5期	赵俊三	第7期	王家耀	王新洲	第8期	李 陶	张剑清	冯文灏	刘焱雄
第9期	张宏伟	袁修孝									

2006 年

第3期	张晓东	第4期	梅 琨	第6期	徐智勇	黄 海	第8期	高成发	朱 庆	潘 励	崔先强
王树根	第10期	袁修孝	童小华	朱俊杰	徐 新	第11期	赵建虎	徐新禹	周兆明	伊廷华	许 军
魏二虎	邹贤才	第12期	宁津生	赵建虎	黄 昕	王爱生	韩保民	伍 岳	张诗玉	方圣辉	刘三超
王 磊	袁修孝	李国平									

2007 年

[illegible]