

# 陆气相互作用中普通双源模型与ALEXI模型比较

胡永红<sup>1</sup> 贾根锁<sup>2</sup>

(1 中国科学院数字地球重点实验室, 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094;

2 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 陆气相互作用影响着天气过程, 进而影响区域气候变化, 基于站点的地表能量平衡研究需要进行合理的空间尺度拓展。遥感模型为地表能量平衡的量化分析提供了条件, 目前已广泛应用于农业和水资源领域, 而较少为气候变化研究服务。介绍了以遥感手段研究陆气相互作用的双源模型, 并通过对比普通遥感双源模型与ALEXI (Atmosphere-Land Exchange Inversion Model) 模型的物理过程, 探讨了ALEXI模型在大尺度应用的优势, 分析了以ALEXI模型为代表的双源模型的发展过程及应用领域, 指出了ALEXI模型在陆气相互作用研究中的优劣。

**关键词:** 洲际尺度, 热红外遥感, ALEXI模型, 陆气相互作用

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.02.002

## Land-Atmospheric Interaction from Remote Sensing: A Comparison between Ordinary Dual-Source Model and ALEXI Model

Hu Yonghong<sup>1</sup>, Jia Gensuo<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Digital Earth, Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100094 2 Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

**Abstract:** Land surface process and climate are linked by surface energy balance, which is the key physical process for coupling between land surface models and climate models. However, field measurements of land-atmosphere interactions, based on a meteorological station are usually limited by their spatial scale for regional climate analysis. In contrast, two-source energy balance models (TSEB), based on remote sensing, perform well in local surface energy balance, which has been widely used in agriculture and water resources to monitor local or regional evapotranspiration variation, and its results (soil heat flux, sensible heat flux, latent heat flux, etc.) could become the data sources for climate change research. This study tries to analyze the differences of physical process between ordinary two-source energy balance model (e.g. N95) and Atmosphere-Land Exchange Inversion Model (ALEXI) to examine how to apply ALEXI model to retrieval land-atmosphere interactions in the continental scale, and further explore the new development of ALEXI model to examine how to make it better for future climate research.

**Key words:** continental scale, thermal remote sensing, ALEXI model, land-atmospheric interaction

### 1 引言

作为大气下边界的陆地表面复杂多变, 不同下垫面上的陆气交互作用强烈影响着天气与气候, 其中以北半球中纬度地区受地表过程影响尤为突出。地表能量平衡是联系地表过程和天气、气候的一个纽带, 地表与大气之间的相互作用通过物质与能量的交换来完成, 大气运动过程为地表带来降水等天气现象, 地球表面则通过感热和潜热输送为大气运动提供驱动能量, 进而影响着天气过程。气象观测是获取陆气相互

作用信息的常用手段, 但以我国为例, 气象台站分布不均匀且下垫面类型复杂多样, 限制着台站获取的流量信息的空间代表性。而基于遥感数据的地表能量平衡分析模型, 为陆气相互作用的空间量化提供了条件。

地表能量平衡组分的遥感研究为传统站点尺度的陆气相互作用分析提供了空间拓展。根据模型中地表通量源区的差异, 用于地表能量平衡研究的遥感模型分为单源模型和双源模型两类。其中, 单源模型类似于陆面过程模式中的大叶模型, 已在下垫面均一的小流域研究中取得了较好效果, 而在类似干旱半干旱稀疏植被区域存在较大误差, 因为这类区域需要考虑像元内不同类型的组分温度差异, 才能获取较准确的逐像元的地表能量平衡分量。目前单源模型多用于定量

收稿日期: 2011年11月13日; 修回日期: 2011年12月21日

第一作者: 胡永红 (1979—), Email: yonghonghu@ceode.ac.cn

资助信息: 国家重点基础研究发展计划 (2009CB723904);

中科院战略性先导科技专项 (XDA05090203)

分析小流域的蒸散<sup>[1-6]</sup>，而对于复杂下垫面上的陆气交互特征、大尺度的陆气能量交换特征监测及长时间序列分析的实现还存在许多待提高之处。双源模型则分开考虑植被和裸土与大气之间的相互作用，使用了像元水平内的组分温度的分解以及相应的算法完成各组分与大气能量交换过程的量算，部分分层处理方法也得到了应用。

## 2 普通双源遥感模型

双层模型最早于1985年提出<sup>[7]</sup>，认为陆气相互作用是水汽和热量两个源相互叠加传输，参考高度处的感热和潜热通量则是两层之和，但是分层处理方法在遥感领域实现难度较大，研究者将其简化为了双源模型<sup>[8]</sup>，便于将遥感获取的空间辐射信息与气象观测相整合。根据不同的研究目标，研究者对双源模型进行了不同程度的拓展，发展了应用于小流域尺度的普通双源模型（Two Source Energy Balance Model, TSEB）和应用于大尺度研究的ALEXI模型（Atmosphere-Land Exchange Inversion Model, ALEXI）<sup>[9, 10]</sup>。这里首先以普通双源模型N95为例探讨其物理过程的实现。

双源模型的物理基础与单源模型相同，也是假设卫星过境时近地表能量交换处于平衡状态。为了准确得到地物的发射能量，需要去除被测地物反射的环境辐射：

$$T_B(\phi) = \left[ \varepsilon(\phi)(T_R(\phi))^n + (1 - \varepsilon(\phi))T_{SKY}^n \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

其中， $\phi$ 为卫星观测角， $T_B$ 为传感器获得方向性的亮温数据， $\varepsilon(\phi)$ 为发射率， $T_{SKY}$ 为半球天空亮温， $T_R$ 为地表辐射温度。

双源模型要求对传感器获得的亮温数据进行预处理和组分温度分解，当把像元内的土壤和植被组分看作为单一发射率的时候，像元温度可以通过比尔定律进行分解：

$$T_R(\phi) = \left[ f(\phi)T_C^n + (1 - f(\phi))T_S^n \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

其中， $T_C$ 和 $T_S$ 分别为植被冠层温度和地表温度， $n$ 是温度指数，对于8~14 $\mu\text{m}$ 和10~12 $\mu\text{m}$ 的热红外波段一般取常数4。 $f(\phi)$ 为植被覆盖率：

$$f(\phi) = 1 - e^{\left(\frac{-0.5F}{\cos\phi}\right)} \quad (3)$$

其中， $F$ 为叶面积指数。

双源模型假设地表不同组分间与大气的能量平衡交换状态是平行的，所以感热通量分别由植被和土壤的感热传输两个部分组成：

$$H = \rho c_p \frac{T_{a(\phi)} - T_a}{r_a} = H_s + H_c = \rho c_p \left( \frac{T_0 - T_a}{r_a + r_s} + \frac{T_C - T_a}{r_a} \right) \quad (4)$$

其中， $H$ 为感热通量，包括植被（ $H_C$ ）与土壤（ $H_S$ ）两

个部分， $\rho$ 为空气密度（ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ）， $c_p$ 是空气热量常数（ $1004\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ）， $r_a$ 为从冠层高度上的空气动力学阻抗， $r_s$ 为土壤表面空气动力学阻抗， $T_a$ 为气温， $T_C$ 为冠层温度， $T_0$ 为地表温度。

根据方程（4）求取感热通量的时候，需要像元组分温度，而组分温度的分解涉及到冠层温度的初始化，对于多角度的热红外传感器来说，可以联立多个角度的辐射温度分解方程求解，但是大多数遥感传感器并未设置多个热红外通道或多个观测角度，因此这里使用了P-T近似（Priestly-Taylor）对冠层进行初始化处理：

$$H_C = \left( 1 - 1.3 \times \text{GVF} \times \frac{S}{S + \gamma} \right) \Delta R_n = \rho c_p \frac{T_C - T_a}{r_a} \quad (5)$$

其中，GVF是植被覆盖率， $\gamma$ 是干湿球常数（ $0.066\text{kPa}\cdot\text{C}^{-1}$ ）， $S$ 是饱和和水气压-气温斜率曲线， $\Delta R_n$ 是冠层净辐射收支。这里联立求解出 $T_C$ 后，代入辐射能量分解的方程可以求解出 $T_S$ ，因此有关土壤表面的能量平衡的初始状态可表达为：

$$H_s = \rho c_p \left( \frac{T_S - T_a}{r_a + r_s} \right) \quad (6)$$

$$LE_s = R_{n,s} - H_s - G \quad (7)$$

其中， $LE_s$ 为土壤表面潜热通量， $R_{n,s}$ 为土壤表面净辐射， $G$ 为土壤热通量。假如 $LE_s$ 是正值，那么地表能量的各组分就可以通过能量平衡的原理得到。如果 $LE_s$ 为负值，则将 $LE_s$ 赋值为0，那么上式可以得到 $H_s$ ，进而可以根据这个值计算得到 $T_S$ ，根据辐射能量分解方程计算得到 $T_C$ ，进而可以重新计算冠层的感热和潜热：

$$H_C = \rho c_p \left( \frac{T_C - T_a}{r_a} \right) \quad (8)$$

$$LE_C = \Delta R_n - H_C \quad (9)$$

其中， $LE_C$ 为植被表面潜热通量， $H_C$ 为植被表面感热通量。该迭代计算过程需要对蒸散和潜在蒸散进行对比判断，并以 $H_C > \Delta R_n$ 作为条件，控制迭代过程的合理稳定，在一定程度上弥补了由单通道热红外遥感数据的初值选择误差引起的缺陷。

## 3 应用于大尺度陆气相互作用研究的ALEXI模型

对于气候变化研究而言，大空间尺度和高时间分辨率的地表能量组分信息能够为气候分析和地表过程参数化提供参考，而使用普通TSEB模型获取该信息存在较大难度。对星载观测平台调查发现，只有对地静止卫星能够满足要求，才可实现洲际尺度上的高频次对地观测。根据对地静止卫星的特点，研究者开发了ALEXI模型<sup>[9, 10]</sup>，该模型以上述普通双源模型为

模型地面组分(图1),同时耦合边界层模型为模型的边界层组分(图2),使用同一天内两个不同时间段的卫星辐射温度作为控制输入进行运算,解决了普通双源感模型中普遍存在的一些限制,如:(1)普通双源模型要求一些必要的实时气象参数作为输入,且通常采用逐个站点的经验参数调校来处理,这种方法不适用于大区域上的研究;(2)部分研究使用了辐射温度来替代空气动力学温度来分析表层大气的能量交换,而实际上辐射温度与空气动力学温度存在差异,且辐射温度值的变化具有角度依赖性;(3)卫星观测到的辐射值受到大气消减的影响,或卫星对地观测的是非代表性的空间样本,这均会导致亮温的偏差,从而影响通量反演的准确性。

ALEXI模型分成地面和大气两个组成部分,其中地面部分的方程组提供初始化的输入,而大气部分为模型

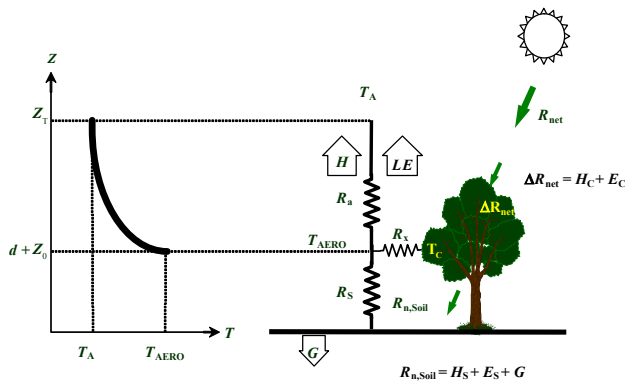


图1 ALEXI模型地面组分结构示意图<sup>[9]</sup>  
(具体参数见模型过程叙述部分,其中 $z_0$ 为初始高度或零平面位移, $z_1$ 通常指掺混层处高度)

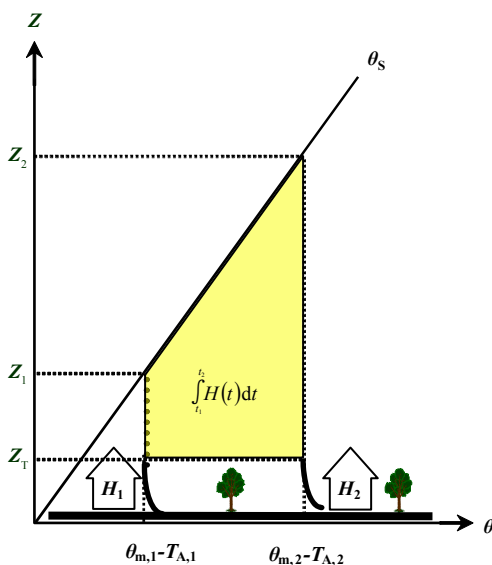


图2 ALEXI模型边界层组分结构示意图<sup>[9]</sup>  
(具体参数见模型过程叙述部分,其中 $z_1$ 和 $z_2$ 分别对应上午静止星的两个观测时段,即陆面组分执行的两个时段)

迭代运算提供约束条件。其中地面部分主要包括:辐射温度分解:

$$T_R(\Phi) = [f(\Phi)T_C^n + (1-f(\Phi))T_S^n]^{\frac{1}{n}} \quad (10)$$

土壤和植被区域能量收支:

$$R_{n,S} = LE_S + H_S + G \quad (11)$$

$$R_{n,C} = LE_C + H_C \quad (12)$$

净辐射:

$$R_n = R_{n,C} + R_{n,S} \quad (13)$$

$$R_{n,S} = R_n e^{\left(\frac{-kF}{\sqrt{2\cos\Phi}}\right)} \quad (14)$$

感热通量:

$$H = H_S + H_C \quad (15)$$

$$H_S = \rho c_p \frac{T_S - T_a}{R_a + R_s} \quad (16)$$

$$H_C = \rho c_p \frac{T_C - T_a}{R_a} \quad (17)$$

潜热通量:

$$LE = LE_S + LE_C \quad (18)$$

$$LE_C = \alpha_{PT} f_g \frac{S}{S + \gamma} R_{n,C} \quad (19)$$

土壤热通量:

$$G = a_g R_{n,S} \quad (20)$$

其中, $R_n$ 为净辐射, $H$ 为感热通量, $LE$ 为潜热通量。 $R_n$ 共包括两个部分:裸土区域土壤净辐射( $R_{n,S}$ )和植被区域净辐射( $R_{n,C}$ ),土壤表面净辐射的计算加入了消光系数,CUPID植被模型模拟发现大部分的植被消光系数位于0.3~0.6之间( $k$ 为消光系数,取0.45)。 $R_{n,S}$ 包括裸土区域的潜热通量( $LE_S$ )、感热通量( $H_S$ )和土壤热通量( $G$ ), $R_{n,C}$ 包括植被区域的潜热通量( $LE_C$ )和感热通量( $H_C$ )。 $LE_C$ 采用Priestley-Taylor近似方法求取,其中 $f_g$ 为植被覆盖度, $\alpha_{PT}$ 为Priestley-Taylor系数,取1.26。 $T_C$ 和 $T_S$ 分别为植被冠层温度和地表温度, $T_a$ 为近地层空气温度, $n$ 是温度指数,对于8~14 $\mu\text{m}$ 和10~12 $\mu\text{m}$ 的热红外波段一般取常数4<sup>[8]</sup>。 $\rho$ 为空气密度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), $c_p$ 是空气热量常数( $1004\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), $r_a$ 为冠层高度上的空气动力学阻抗, $r_s$ 为土壤表面空气动力学阻抗, $\gamma$ 是干湿球常数( $0.066\text{kPa}\cdot\text{C}^{-1}$ ), $S$ 是饱和水汽气压气温斜率曲线, $a_g$ 为地表向土壤深层的热传导系数,位于0.2~0.5之间(ALEXI取0.31)。通过对上述方程组(公式(10)~(20))分析发现11个方程却存在12个未知数: $T_a$ , $T_S$ , $T_C$ , $R_{n,S}$ , $R_{n,C}$ , $H$ , $H_S$ , $H_C$ , $LE$ , $LE_S$ , $LE_C$ , $G$ ,难以求解。为此,ALEXI模型耦合了一个边界层大气模型进行计算。

ALEXI模型大气组分采用大气边界层Slab模型,以静止卫星两个时段的地表辐射温度变化信息指

示地表和边界层的能量收支变化，不再需要相应的气温作为模型的控制输入参数。模型假设掺混层内所有气体的温度是均一的，近地层这个关系可以表达为：

$$\theta_m = T_a \left( \frac{100}{P} \right)^{R/c_p} \quad (21)$$

其中， $\theta_m$ 是位温， $P$ 是 $T_a$ 观测高度处的大气压（kPa）且 $R/c_p=0.286$ 。然后把两个时段的通量传输与大气的边界层高度变化联系起来：

$$\int_{t_1}^{t_2} H(t) dt = \rho c_p (z_2 \theta_{m_2} - z_1 \theta_{m_1}) - \rho c_p \int_{z_1}^{z_2} \theta_s(z) dz \quad (22)$$

其中， $z_1$ 和 $z_2$ 分别为温度 $\theta_{m_1}$ 和 $\theta_{m_2}$ 的观测高度。为了把这种时间积分形式的感热通量变化与卫星过境时的即时通量联系起来，ALEXI假设上午时间（日出后到中午前）感热通量增加近似线性：

$$\int_{t_1}^{t_2} H(t) dt = \frac{1}{2} (H_2 t_2 - H_1 t_1) \quad (23)$$

其中， $H_2$ 和 $H_1$ 分别是 $t_2$ 和 $t_1$ 时刻的即时感热通量。当ALEXI模型两个组分进行迭代计算至感热通量收敛时，可以进一步做地表其他各能量组分的分析。

## 4 模型应用进展

### 4.1 普通 TSEB 模型应用与限制

普通双源模型偏重于遥感领域在农业和水资源方面的应用，并未将模型运行得到的空间结果用于气候变化分析研究。如国内研究者以黄淮海平原为例对比了双层模型与单层模型对旱情分析的优劣<sup>[11]</sup>，并结合观测资料对双源模型进行了改进<sup>[12]</sup>，在华北平原的通量分析应用了经验方法、能量平衡方法和陆面模型法等<sup>[13]</sup>。研究发现相对于单源模型，利用组分温差的特点推算潜热通量变化，有助于传统双源模型的改进<sup>[14]</sup>，尤其对于不同植被覆盖梯度下双源模型的应用<sup>[15]</sup>。部分研究者提出使用多角度热辐射遥感数据用于更精确的地表温度反演，研究地表热通量，但具有多角度观测的卫星平台有限，同时准确度和广适性仍然需要进一步检验<sup>[16]</sup>。

总的来说，普通双源模型更加真实地刻画了稀疏植被覆盖下的水热通量系统，理论上比单源模型更合理，更适合在下垫面异质性强的区域开展研究<sup>[10, 17, 18]</sup>。但是，模型应用需要考虑不同尺度的影响<sup>[19]</sup>，尤其对于小尺度应用，通过土壤—植被—大气模型模拟发现，需要考虑净辐射分配方案、植被聚集效应，以及P-T近似的系数和土壤感热传输的阻抗如何调整。模型敏感性检验发现，地表温度和气温的差异是最重要因素，其次是植被覆盖度<sup>[17]</sup>。双源模型所采用的平行处理模式与系列模式相比，对于能量的分配更精确<sup>[20]</sup>，Norman等<sup>[21]</sup>提出了DTD (Dual-temperature-difference) 方法来改进双源模型对于湍流通量的分析，进一步简化了双源模型的

运算，与通量塔结果对比RMSE误差为 $60W \cdot m^{-2}$ 。然而，这类模型在大尺度分析研究方面始终存在限制因素，如何进行能量组分的升尺度研究还需更多的工作<sup>[22]</sup>。普通双源模型虽然提高了模型精度，扩大了适用范围，但是复杂的参数和处理过程也降低了模型的易用性，部分研究者认为陆面数据同化技术<sup>[23]</sup>和微波手段<sup>[20]</sup>将对模型的物理过程完善和准确预测方面提供帮助。

### 4.2 ALEXI 模型应用与拓展

ALEXI模型应用于大尺度的研究具备了详细的理论基础。Anderson等根据上午地表辐射温度近似线性上升的特性，与边界层模型相结合，发展形成了用于分析大尺度陆气相互作用的ALEXI模型<sup>[10]</sup>，并结合卫星数据的现状，提出了利用GEOS静止卫星的数据分析北美地区陆气相互作用的具体案例。模型中使用GEOS8静止气象卫星的热红外波段数据作为地表温度的反演数据源，挑选晴空条件下当地日出后1.5小时和5.5小时的数据作为初始输入，并使用中分辨率的AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 卫星影像提取植被覆盖信息，结合土地覆盖数据和地表观测对部分地表与大气因子进行参数化，风速和大气气温的垂直递减率来自地面气象信息监测和相应的探空数据，研究发现模型能够提供较好的大尺度地表能量平衡的空间信息<sup>[9]</sup>。ALEXI模型在TSEB (N95) 模型基础上的改进可见表1。

表1 ALEXI模型与普通TSEB (N95) 模型差异对比

模型改进内容	ALEXI模型	普通TSEB (N95) 模型
应用目的	大尺度陆气相互作用	小流域蒸散发
卫星数据源	静止卫星 (FY, GOES, MTSAT等)	极轨卫星 (Landsat、ASTER等) 或地表辐射观测
空间分辨率	洲际尺度	站点或小流域尺度
时间分辨率	长时间序列日数据	部分时间段
是否需要气象数据	需要 (探空数据为主)	需要 (地表气象参数为主)
辐射输入	静止卫星小时反演结果	观测或经验辐射模型
地表反照率	经验方法 (根据土地覆盖类型, 限定经验参数)	遥感多波段反演或观测
地表温度输入	上午两个时次	单个时次
物理过程	耦合边界层slab模型	非耦合

ALEXI模型提出后在许多领域和外场试验中得到了检验和应用。其中Anderson等将ALEXI模型应用到了ISLSCP和Monsoon 90的试验外场<sup>[10]</sup>；Kustas等在ALEXI的基础上，为了给微气象尺度（100m以下）的地气能量分析提供驱动信息，发展了DISALEXI以适应低时间分辨率、中高空间分辨率的遥感数据（如Landsat、ASTER和MODIS数据）分析<sup>[24]</sup>；Anderson等发展了基于植被、地表温度等卫星遥感和地面观测数据的地气传输参数化方法，用于对上述计算得到的通量数据进行升尺度分析<sup>[22]</sup>。Anderson等应用ALEXI和DISALEXI模型，配合加入的光能利用率模

型,研究了小尺度到区域尺度的水、热通量及碳通量特征<sup>[25]</sup>。同时,Anderson等发现云的影响导致ALEXI模型的输出存在空值,为了弥补空值对数据缺失造成的影响,提出了一个新的方法来做空值处理<sup>[26,27]</sup>,该方法假定像元尺度上有云存在时的蒸散率与晴空条件下相同,晴空时蒸散率是地表水分含量的函数,如果知道了地表水分含量就可以反推蒸散率。进入21世纪后,ALEXI在多种景观类型、农业领域和陆气相互作用领域进行了测试,在西半球由GEOS气象卫星模拟得到的数据结果已可作为模式同化信息的数据源,部分研究者尝试将模型的部分结果输入WRF模式以改进天气模拟<sup>[28,29]</sup>。

### 4.3 ALEXI 模型进展分析

ALEXI模型有两个方面的重要改进。首先,ALEXI模型耦合了一个边界层模型,不再依赖近地层气温作为控制输入。边界层模型能够模拟自身的近地面气象条件,同时也减小了遥感与地面观测不匹配而产生的误差。普通TSEB模型运算通常需辅助气象数据,而气象数据插值到遥感适用的格网上会产生较大误差,研究发现异质性表面会导致近地面气温空间分布格局不同,进而影响通量预测精度。其次,ALEXI模型将地表能量收支与地表温度的时间变化率联系起来,因为卫星反演温度受限于传感器校正及其他多种因素,包括表面比辐射率的缺少、大气校正误差等,这些误差通常是时间相关的,通过时间变化计算可以很大程度上减弱误差的影响。

ALEXI模型以卫星成像瞬时地表能量交换处于平衡态为物理基础。假设土壤、冠层总能量收支是平衡的,能量收支的分配与净辐射强迫有关,且净辐射在土壤和植被中的分配依赖于地表的植被覆盖度。白天对于土壤的能量传导假定了一个系数,这是从土壤模型中简化而来的。假定植被覆盖度确定,ALEXI模型可以从卫星辐射温度中提取土壤和植被的组分温度。计算的时候保留了卫星的视角参数,用于适应非星下点的观测数据。采用 $T_s$ 、 $T_c$ 和初始预测的近地面温度 $T_a$ ,ALEXI可以计算土壤和冠层的感热。简化的P-T近似提供了冠层潜热的初始预测,这个近似假设冠层在其潜在蒸发速率下进行,由于没有考虑土壤水分以及其他因素的限制,所以会造成对干旱或者半干旱区生态系统蒸散水平的高估。假如计算导致了负的土壤潜热通量,P-T对于冠层的蒸发将被减少,一直到土壤的潜热为0。然后接着进行迭代计算。

ALEXI模型将上午边界层位温变化与不同时刻卫星辐射温度联系起来。为了简化计算,通常认为上午的感热通量是线性上升的,实际计算中,采用迭

代的方法计算模型中关于表面和大气的组分,以便于调整近地面的气温预测,直到得到的每个组分时间积分的感热通量计算收敛。其中,模型在大气组部分考虑应用无线电探空提取上午大气温度廓线信息,结合边界层模型用于分析判断边界层高度的发展变化;在陆表组部分,用静止卫星数据对ALEXI的陆面部分执行两次计算,得出相应的近地面的气温变化。边界层模型与地面双源模型耦合的优势在于减弱了对于辅助数据气温的需求。ALEXI模型采用两次的卫星亮温观测来监测温度变化信息,是比较理想的手段。对于晴空来说,感热在这个时间间隔的增加是近线性的。假如存在以时间为函数的特定形式的感热通量,那么观测时段上的通量积分以及两个瞬时的通量值都能够计算得到。用边界层特征来加强能量闭合有助于提高采用遥感或同步数据资源预测地表能量平衡的能力。

ALEXI模型应用存在一些限制因素:(1)卫星数据选择限制了ALEXI的应用。该模型的输入要求两个时段的静止卫星数据,以满足边界层模型的需求。虽然研究者也开发了DISALEXI进行中分辨率卫星平台应用,但是DISALEXI要求以ALEXI模型结果为控制输入;(2)卫星数据资源是否能够满足长时间序列应用。覆盖西半球的静止气象卫星从1975年以来已经发射了12颗,历经了三代,数据资源丰富;而东半球静止气象卫星出现于20世纪90年代中期,我国的FY-2C静止气象业务卫星发射于2004年,从气候分析所需的时间序列长度而言,还存在一定的不足,这是模型发展存在的一些客观限制;(3)ALEXI等模型应用于陆气相互作用分析的时候,均使用了热量和动量传输的空气动力学阻抗来描述湍流通量的交换,但是在实际分析中,获得大尺度的精确的空气动力学阻抗数据存在相当大的难度,通常站点观测数据能够得到点上的结果,而大尺度的分析应用常常采用地表覆盖参数来经验化的表示这些地表特征参数,这样导致模型分析结果存在一定的不确定性;

(4)ALEXI应用于大尺度分析的另外一个不足之处是模型与实测数据的订正,对于站点数据来说,由于大尺度分析格网覆盖面积较大,在一些异质性较强的区域,站点数据不能保证其代表性,这就需要使用大尺度观测分析的通量数据与模型相互订正,但是目前世界上只有极少数地区配置了相应的设备进行观测。

## 5 结论

ALEXI模型相对于普通双源模型有着明显优势,能够应用于洲际尺度的地表能量平衡分析,弱化了对气象数据的依赖,并能为气候分析和模式参数化

提供长时间序列的研究数据。同时, ALEXI模型应用也存在一定的限制条件, 包括卫星平台选择、天气状况的影响和部分模型参数经验化程度高等因素。算法改进、多观测平台数据融合及增加地面校正观测等手段将能逐步减小这些限制因素的影响, 这也是该模型未来研究的重要发展方向。

#### 参考文献

- [1] 潘志强, 刘高焱. 黄河三角洲蒸散的遥感研究. 地球信息科学, 2003, 5(3): 91-96.
- [2] Bastiaanssen W. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. Journal of hydrology, 2000, 229(1-2): 87-100.
- [3] Bastiaanssen W, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) - 1. Formulation. Journal of Hydrology, 1998, 213(1-4): 198-212.
- [4] Jacob F, Olioso A, Gu X F, et al. Mapping surface fluxes using airborne visible, near infrared, thermal infrared remote sensing data and a spatialized surface energy balance model. Agronomie, 2002, 22(6): 669-680.
- [5] Opoku-Duah S, Donoghue D, Burt T P. Intercomparison of evapotranspiration over the savannah Volta Basin in West Africa using remote sensing data. Sensors, 2008, 8(4): 2736-2761.
- [6] 王介民, 高峰, 刘绍民. 流域尺度ET的遥感反演. 遥感技术与应用, 2003, 18(5): 332-338.
- [7] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops - An energy combination theory. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111(469): 839-855.
- [8] 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. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 77(3-4): 263-293.
- [9] Mecikalski J R, Diak G R, Anderson M C, et al. Estimating fluxes on continental scales using remotely sensed data in an atmospheric-land exchange model. Journal of Applied Meteorology, 1999, 38(9): 1352-1369.
- [10] 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. Remote Sensing of Environment, 1997, 60(2): 195-216.
- [11] 隋洪智, 田国良. 农田蒸散双层模型及其在干旱遥感监测中的应用. 遥感学报, 1997, 1(3): 220-224.
- [12] 莫兴国, 林忠辉. 基于Penman-Monteith公式的双源模型的改进. 水利学报, 2000, 31(5): 6-11.
- [13] 沈彦俊, 夏军, 张永强, 等. 陆面蒸散的双源遥感模型及其在华北平原的应用. 水科学进展, 2006, 17(3): 371-375.
- [14] 辛晓洲, 柳钦火, 田国良, 等. 利用土壤水分特征点组分温差假设模拟地表蒸散. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2007, 43(3): 221-227.
- [15] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 中国西北地区蒸发散量计算的遥感研究. 地理学报, 2001, 56(3): 261-268.
- [16] 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. 干旱区地理, 2005, 28(1): 65-71.
- [17] Kustas W P, Norman J M. A two-source energy balance approach using directional radiometric temperature observations for sparse canopy covered surfaces. Agronomy Journal, 2000, 92(5): 847-854.
- [18] 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. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 94(1): 13-29.
- [19] Lhomme J P, Chehbouni A, Monteny B. Effective parameters of surface energy balance in heterogeneous landscape. Boundary-Layer Meteorology, 1994, 71(3): 297-309.
- [20] Li F Q, 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. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(6): 878-891.
- [21] Norman J M, Kustas W P, Prueger J H, et al. Surface flux estimation using radiometric temperature: A dual temperature-difference method to minimize measurement errors. Water Resources Research, 2000, 36(8): 2263-2274.
- [22] Anderson M C, Kustas W P, Norman J M. Upscaling flux observations from local to continental scales using thermal remote sensing. Agronomy Journal, 2007, 99(1): 240-254.
- [23] Crow W T, Kustas W P. Utility of assimilating surface radiometric temperature observations for evaporative fraction and heat transfer coefficient retrieval. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 115(1): 105-130.
- [24] Kustas W P, Norman J M, Anderson M C, et al. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(4): 429-440.
- [25] Anderson M C, Norman J M, Kustas W P, et al. A thermal-based remote sensing technique for routine mapping of land-surface carbon, water and energy fluxes from field to regional scales. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(12): 4227-4241.
- [26] Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, et al. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 1. Model formulation. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2007, 112(D10).
- [27] Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, et al. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 2. Surface moisture climatology. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2007, 112(D11).
- [28] Mecikalski J R, Mackaro S M, Anderson M C, et al. Evaluating the use of the Atmospheric Land Exchange Inverse (ALEXI) model in short-term prediction and mesoscale diagnosis. Conference on Hydrology, San Diego, CA, USA, January 2005.
- [29] Hain C R, Mecikalski J R, Anderson M C, et al. Initialization of MM5/WRF simulations with ALEXI-derived volumetric soil moisture estimates. 10th Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), American Meteorological Society, Atlanta, GA. 2006.

#### 下期要目

- ◆ 热带海气边界层观测研究若干进展
- ◆ 月平均大气环流与短期气候预测
- ◆ 作物模型、遥感和地理信息系统在国外农业气象服务中的应用进展及启示
- ◆ 一种基于复杂网络社团的CDN性能优化模型