

地表蒸散的遥感估算模型及其在农业干旱监测中的应用^{*}

郑有飞^{1,2,*} 陈 鹏² 吴荣军² Xiwu Zhan³ Christopher Hain³ Jicheng Liu³

(¹ 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室, 南京 210044; ² 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; ³ The Center for Satellite Applications and Research (STAR), National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS), NOAA, USA)

摘 要 蒸散是地表水热交换的主要过程, 其空间特征差异明显, 而遥感技术的发展与应用使得区域蒸散估算成为现实。本文介绍了基于能量平衡法的单层与双层遥感蒸散模型, 并对这 2 类遥感模型的优缺点分别进行了评述和比较。重点综述了近年来得到发展和应用的大气-陆地交换反演模型(ALEXI), 阐述其主要结构、特色和过程。该模型通过耦合双层能量平衡模型(TSEB)和简化边界层模型, 减少以往模型对台站气象数据的依赖, 明显提高区域蒸散估算精度。研究表明, 基于该模型的蒸散胁迫指数(ESI)具有很强的区域干旱监测能力。在今后研究中, 多元遥感数据融合技术、陆面数据同化系统与遥感蒸散模型的结合将成为该领域的研究热点。

关键词 蒸散; 遥感; 能量平衡; ALEXI 模型; 干旱监测

中图分类号 S963 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)4-0837-08

Remote sensing estimation models for land surface evapotranspiration and their applications in agricultural drought monitoring. ZHENG You-fei^{1,2}, CHEN Peng², WU Rong-jun², Xiwu ZHAN³, Christopher HAIN³, Jicheng LIU³ (¹ Jiangsu Key Laboratory for Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing 210044, China; ² College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; ³ The Center for Satellite Applications and Research (STAR), National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS), NOAA, USA). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(4): 837-844.

Abstract: Evapotranspiration (ET) is the major process of Earth's surface water and heat exchange, and has obvious spatial variation. The development and application of remote sensing technology make the regional estimation of ET realistic. This paper reviewed the research progress in the remote sensing regional ET estimation models, including single and two-layer models based on land surface energy balance, with the focus on the algorithm and characteristics of the Atmosphere-Land Exchange Inverse model (ALEXI) developed in recent years. To overcome the limitation of meteorological data, the ALEXI was coupled with Two-Source Energy Balance model (TSEB) and simplified atmospheric boundary layer model, and thereby, improved the estimation accuracy. Substantial studies showed that the ALEXI evaporative stress index (ESI) had strong capacity in regional drought monitoring. In order to give a better operational drought monitoring service, the combination of multi-source remote sensing data fusion technology, land surface data assimilation system, and remote sensing ET estimation models could be an important research field in the future.

Key words: evapotranspiration; remote sensing; energy balance; ALEXI Model; drought monitoring.

* 国家自然科学基金项目(41075114、40775072)资助。

* * 通讯作者 E-mail: zhengyf@nuist.edu.cn

收稿日期: 2010-10-05 接受日期: 2010-12-16

地表蒸散 (evapotranspiration, ET) 是水圈、大气圈和生物圈水分和能量交换的主要过程, 陆地水文过程中的水分和能量在海洋与陆地内部以及相互之间的交换, 调节着全球水分和能量的分布 (Peixoto *et al.*, 1995)。因此, 蒸散的准确估算对于农业干旱和水文干旱监测、水资源分布及利用、农业生产管理和全球气候变化评估等具有重要的参考价值。

地表蒸散过程涉及气象、土壤、植物、水利、地理等领域, 是多学科交叉的复杂过程。随着人们对大气边界层湍流场认识的深化及观测方法的改进, 地表蒸散计算理论得到不断的发展和完善。Bowen (1926) 利用地表能量平衡方程建立了波文比能量平衡法 (Bowen Ratio Energy Balance, BREB); Thornthwaite 和 Holzman (1944) 利用近地面边界层相似理论, 提出了计算蒸发的空气动力学方法; Penman (1948) 在实验的基础上提出了能量平衡和空气动力学联合蒸散方程; Monteith (1973) 在研究作物的蒸散发中引入表面阻抗的概念, 得到了 Penman-Monteith (P-M) 公式。这些算法都是基于单个观测站点的资料, 开展的局地尺度的蒸散研究。

然而, 大量的研究表明, 蒸散的时空分布与区域气象条件、土壤水分状况、植被覆盖等因素紧密相关。较大尺度的陆面蒸散特征差异, 使得传统的局地尺度研究方法很难直接应用到区域尺度。而遥感技术具有快速、经济、宏观等特点, 尤其是它的可见光、近红外和热红外波段数据可提供大范围的地表特征参数和热信息, 这使蒸散研究从站点走向区域、从定性走向定量半定量成为现实。Brown 和 Rosenberg (1973) 根据能量平衡-作物阻抗原理提出了一个作物阻抗-蒸散模型, 为热红外遥感温度应用到蒸散模型提供了理论依据。Jackson 等 (1977) 对 Brown 和 Rosenberg 的蒸散模型进行了简化, 并建立了冠气温差与蒸散的统计模型。Shuttleworth 和 Wallance (1985) 建立了稀疏植被的系列双层蒸散模型, Norman 等 (1995) 在系列双层模型的基础上建立了平行双层模型, 苏中波 (2002) 和 Bastiaanssen 等 (1998) 分别提出了目前应用较为广泛的陆面能量平衡系统 (Surface Energy Balance System, SEBS) 和陆地表面能量平衡算法 (Surface Energy Balance Algorithm for Land, SEBAL)。近几十年里, 利用遥感技术及气象数据发展区域遥感蒸散模型取得了很大进展, 由最初仅描述土壤-植被系统与大气间的能量交换的单层模型, 已经发展到了现在的两层、三层,

甚至多层模型, 可详尽描述冠层与土壤内部的微气象廓线 (辛晓洲, 2003; 王娅娟和孙丹峰, 2005)。

本文将主要介绍基于能量平衡法的单层与双层遥感蒸散模型, 比较其优缺点, 重点介绍近年来新发展的大气-陆地交换反演模型 (Atmosphere-Land Exchange Inversion Model, ALEXI), 并阐述该模型的主要结构、特色和过程, 展望其在当前及今后干旱监测中的应用。

1 单层遥感蒸散模型

单层遥感蒸散模型针对的是在土壤-植被-大气系统 (soil-vegetation-atmosphere system, SVAT) 中, 不区分土壤和植被, 将之视为一张“大叶”与外界进行水分和热量的交换, 故又称为“大叶”模型。该模型首先利用地表温度与气温的差值以及空气动力学阻抗确定显热通量, 然后由能量平衡方程估算潜热通量。模型的表达式为:

$$H = \rho C_p \frac{T_{aero} - T_a}{r_a} \quad (1)$$

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

式中: R_n 为净辐射通量 ($W \cdot m^{-2}$), H 为感 (显) 热通量 ($W \cdot m^{-2}$), λE 为潜热通量 ($W \cdot m^{-2}$), G 为土壤热通量 ($W \cdot m^{-2}$), ρ 为空气密度 ($kg \cdot m^{-3}$), C_p 为空气定压比热容 ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), T_{aero} 为地表温度 (K), T_a 为参考高度的气温 (K), r_a 为空气动力学阻抗 ($s \cdot m^{-1}$)。

根据空气动力学相似性理论, 与湍流热通量直接相关的是空气动力学温度 (T_{aero}), 即热量交换源 (汇) 处的温度, 可利用温度廓线外推得到, 但在实际应用中很难确定。这是单层模型应用中影响蒸散估算精度的一个重要难题。众多研究表明, 空气动力学温度与地表辐射温度在植被覆盖较好条件下相差 $1^\circ C \sim 2^\circ C$, 在稀疏植被覆盖下可达 $10^\circ C$ 甚至更多 (Kustas *et al.*, 1989)。直接利用遥感获取的地表辐射温度 (T_{rad}) 代替空气动力学温度, 势必会给蒸散估算结果带来较大误差。目前较为常用的修正方法有 2 种: 一是在空气动力学阻抗之后增加经验“剩余阻抗” (Stewart *et al.*, 1994), 作为 T_{rad} 代替 T_{aero} 的调节因子, 减少二者的误差; 二是通过站点实验数据, 确定经验调节系数, 直接对辐射温度与空气动力学温度的温差进行调整 (Troufleau *et al.*, 1997)。虽然上述 2 种方法在一定程度上可以减小因利用 T_{rad} 代替 T_{aero} 造成的估算误差, 但它们都是经

验性的,受下垫面、气象条件的制约较大,很难找到一个稳定不变的关系来反映所有这些因子的影响,具有很强的地域性。在单层模型估算蒸散的过程中,除了因利用 T_{rad} 代替 T_{aero} 会引起误差,还存在因忽略土壤热量传输阻抗与冠层动量传输阻抗的差别而引起的误差,这一缺陷可通过增加“剩余动力学阻抗”项进行修正 (McNaughton & van den Hurk, 1995)。

目前应用较为广泛的单层模型有 2 种,即陆面能量平衡算法 (Surface Energy Balance Algorithm for Land, SEBAL) (Bastiaanssen *et al.*, 1998) 和陆面能量平衡系统 (Surface Energy Balance System, SEBS) (Su, 2002)。其中, SEBAL 模型引入了“极干”和“极湿”的概念,基于遥感反演得到的地表特征参数 (NDVI、地表温度、地表反照率、地表比辐射率等),并结合少量辅助气象数据 (风速、气温等),估算不同土地覆盖类型的地表通量。该模型的实用性与可靠性已得到验证,是当今国际上应用较好的模型之一 (Bastiaanssen, 2000; Bastiaanssen *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 1998; Tasumi *et al.*, 2005)。而 SEBS 则基于能量平衡指数 (Surface Energy Balance Index, SEBI) 概念,逐像元计算“干限”和“湿限”的能量平衡,以确定温度梯度的边界条件,使感热通量估算结果更加准确。而且, SEBS 还提出了 kB-1 的参数化计算方法,减小了因非均匀下垫面的热量粗糙度不确定而带来的通量估算误差。

单层模型物理意义明确,需要的输入数据极少,计算简洁。它假设感热和潜热交换是在相同的空气温度下进行的,系统拥有饱和水汽源,冠层表面和叶片气孔腔温度相同,单层“大叶”与参考高度处的感热和潜热交换从同一高度开始,这在反演植被覆盖度较高,下垫面均匀的区域陆面蒸散时精度较高 (高彦春和龙笛, 2008)。但在地表为部分植被覆盖时,单层模型的假设前提就不满足,估算精度下降。因此,为了更加真实地模拟土壤与冠层之间水分、热量的相互作用,分别获取土壤和植被组分的通量,双层、三层甚至多层模型逐渐被提出并建立。

2 双层遥感蒸散模型

最初的双层模型是由 Shuttleworth 和 Wallace 在 1985 年首先提出来的,也叫“系列”模型 (Series Model),该模型将地表蒸散分离为土壤蒸发和冠层蒸散,并考虑了二者的耦合效应。之后一些学者根

据各自的研究需要对该模型不断改进 (Shuttleworth & Gurney, 1990; Wallace, 1997),直到 Norman 等 (1995) 对该模型进行了简化,并提出了“平行”模型 (Parallel Model),该模型假设土壤与冠层之间的能量通量相互平行,二者各自独立地与上层空气进行湍流交换,不存在耦合效应。在半干旱区域的稀疏植被条件下,地表风速为中等以下时,土壤蒸发和冠层蒸腾之间只有微弱的耦合关系,“平行”模型和“系列”模型的结果较为一致,且前者较后者的计算更为简便。而当地表受到严重水分胁迫时,由于土壤感热通量对冠层气温影响较大,“系列”模型可很好地模拟该过程,所以其计算结果相比“平行”模型更为精确 (Norman *et al.*, 1995)。同时,“系列”与“平行”模型的模拟精度与稀疏指数 (植被间裸露土壤的斑块尺度与植被高度的比值) 紧密相关,稀疏指数越高,“平行”模型得到的估算结果精度越好,反之,“系列”模型给出的精度更高 (Lhomme *et al.*, 1999)。

上述“系列”和“平行”模型主要是从分层角度出发,将地表分为土壤和冠层分别进行考虑。而另一类模型——“补丁”模型 (patch model),着重考虑植被簇生或成团分布情况下的蒸散情况。该模型认为土壤是裸露的,植被像补丁一样镶嵌在土壤表面,将不同的通量源像马赛克或补丁一样并列放置,土壤与植被间无相互作用,土壤、植被分别向大气输送热量和水分。分层模型中,总的水热通量为各组分通量的简单相加;在斑块模型中,总通量为组分通量的面积权重之和 (Blyth & Harding, 1995; Sanchz *et al.*, 2008)。

目前,关于描述土壤-植被-大气连续体内能量交换的模型有很多,其复杂程度的差异也很大。然而,使用最为广泛的还是 TSEB (Two Source Energy Balance) 模型,可以有效的区分地气能量交换过程中土壤和植被的各自贡献。TSEB 模型一般利用定向辐射温度的分解,或通过 Priestley-Taylor 近似公式估算地表未受水分胁迫条件下的热通量初始值和组分温度,建立能量平衡方程,联立方程组求解各组分通量或其他过程参数,最后通过能量余项法得到潜热通量。

与单层模型相比,双层模型分解了作物蒸腾和土壤蒸发作用,分别考虑冠层和土壤的水热吸收转化过程以及二者之间的相互作用,可以更好地描述

土壤、植被与大气之间的能量交换机制,尤其是在稀疏植被覆盖条件下,其优越性更为显著。但双层模型定义了较为复杂的阻抗系统,这些阻抗受植被结构、生理特征及土壤水分状况影响较大,难以直接利用遥感数据获取,成为双层模型精确反演区域蒸散的主要难点。另外,双层模型大多需要多角度的热红外数据反演植被和土壤组分的温度,而在早些时候,我国可利用的此类遥感数据非常少(李召良等, 2000;刘雅妮等,2005),一定程度限制了该类模型在中国的应用。

3 ALEXI 模型

双层模型为提高蒸散估算精度奠定了坚实的理论基础,已成为国内外近年来研究的热点。ALEXI 是基于“系列”阻抗理论和能量平衡原理的经典双层模型,该模型是在 TSEB (Two-Source Energy Balance Model,也称为 TSM)模型(Norman *et al.* ,1995)及其经过 Anderson 等(1997)改进后提出的 TSTIM (Two-Source Time-Integrated Model)模型的基础上,不断发展得到的。其物理机制明确,数据处理较为简便,可快速模拟较大区域范围的地表能量收支状况。ALEXI 模型在估算地表水热通量方面的可靠性和准确性已得到广泛验证(Mecikalski *et al.* , 1999;Anderson *et al.* ,2007a)。

3.1 ALEXI 模型结构

ALEXI 模型主要包括 4 个部分:1)冠层和土壤组分瞬时通量的获取。基于 TSEB 模型,Anderson 等(1997)引入了一个简化的边界层平板模型,用于克服传统双层模型对近地层气温数据的依赖。通过 TSEB 和边界层模型的耦合,ALEXI 模型(图 1)就可将地表辐射温度分解为土壤与冠层的组合,直接估算地气系统各组分的瞬时通量(Norman *et al.* , 1995;Anderson *et al.* ,1997)。

2)瞬时通量的时间拓展。研究表明,正午附近时刻遥感获取的瞬时蒸发比($f_{evap} = \lambda E / (R_n - G)$)在一天之内几乎不变(Hall *et al.* ,1992)。基于此,ALEXI 模型可实现瞬时通量的日、月乃至更长的时间拓展:首先,根据 ALEXI 模型估算出正午时分的瞬时通量计算 f_{evap} ;然后通过遥感数据直接获取当日地表累积净辐射($\langle R_n \rangle$)和当日土壤累积热通量($\langle G \rangle$);最后利用式(2)即可求得当日累计潜热通量($\langle \lambda E \rangle$)和当日累计感热通量($\langle H \rangle$)。

$$\begin{aligned} \langle \lambda E \rangle &= f_{evap} (\langle R_n \rangle - \langle G \rangle) \\ \langle H \rangle &= \langle R_n \rangle - \langle G \rangle - \langle \lambda E \rangle \end{aligned} \tag{2}$$

值得注意的是,以往大量研究表明,利用正午时刻获取的 f_{evap} 估算全天累计通量时,会比观测到的实际通量值低 5% ~ 10%(Brutsaert & Sugita,1992; Zhang & Lemeur,1995;Crago,1996),因此 ALEXI 模

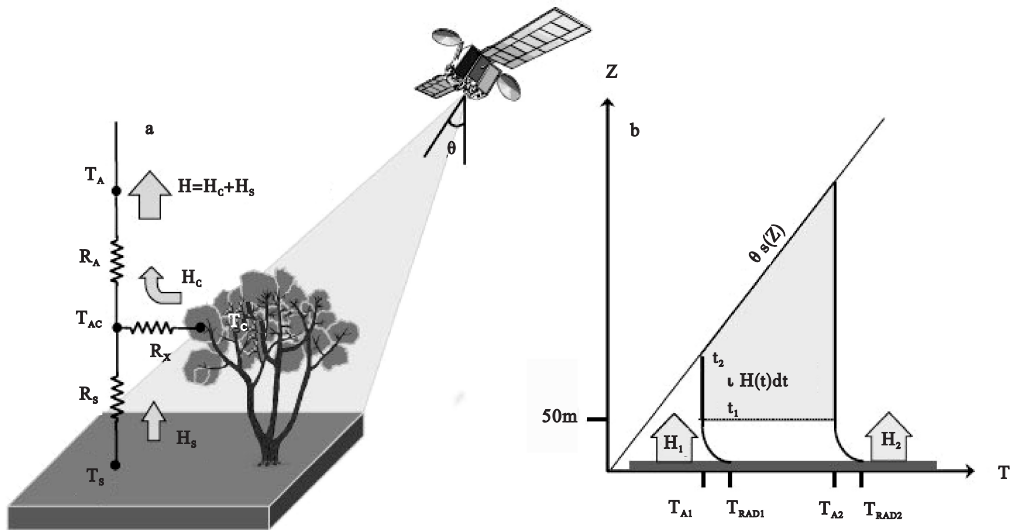


图 1 ALEXI 模型中的 TSEB 模块(a)与简化边界层模块(b) (Anderson *et al.* ,2007a)
Fig. 1 Schematic diagram of the two-source land-surface scheme (a) and the simple slab model of ABL development (b) of the ALEXI model
 T_C 为冠层温度, T_S 为土壤温度, T_A 为参考高度处的气温, T_{AC} 为冠层中的气温; R_A 为冠层与参考高度处空气热交换阻抗, R_S 土壤与冠层进行热交换的阻抗, R_X 为冠层叶与空气进行热交换的阻抗; T_{A1} 、 T_{A2} 为不同时刻的参考高度气温; T_{RAD1} 、 T_{RAD2} 为不同时刻的地表辐射温度; H_1 、 H_2 为不同时刻的瞬时感热通量; $\theta_s(z)$ 为不同时刻的大气位温状况。

型通过增加经验系数对其进行改进(式3):

$$f_{\text{evap}} = 1.1 \frac{\lambda E}{R_n - G} \quad (3)$$

3) 土壤水分信息的获取。土壤水分与植物水势关系的物理机制(Campbell & Norman, 1998),以及地表通量与土壤湿度关系的经验模型(Stewart & Verma, 1992)都表明 f_{PET} 与 f_{AW} 存在一定的关联。其中 f_{PET} 为实际蒸散 $ET(E; \text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$ 与潜在蒸散 $PET(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$ 的比值; f_{AW} 为植被实际可用水分 AW 与理想状态下土壤中有效利用水分 AWC 的比值。

$$f_{\text{PET}} = \frac{E}{PET}$$

$$f_{\text{AW}} = \frac{AW}{AWC} = \frac{(\theta - \theta_{\text{WP}}) \times d}{(\theta_{\text{fc}} - \theta_{\text{WP}}) \times d} \quad (4)$$

式(4), $d(\text{mm})$ 为地表到植被根部的土壤厚度, θ_{WP} 和 $\theta_{\text{fc}}(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$ 分别为凋萎点的土壤体积含水量和田间持水量, θ 为当前水分含量。

ALEXI 模型采用一种标准 Logistic 函数描述 f_{PET} 与 f_{AW} 的关系(Anderson *et al.*, 2007a):

$$f_{\text{PET}} = f_n[f_{\text{AW}}] = \frac{\ln W}{\ln W_f} \quad (5)$$

式(5), W 是一个广泛应用于农业模型中的关于 f_{AW} 的生长方程(France & Thornley, 1984)。潜在蒸散 PET 可通过 Priestley-Taylor 近似估算得到。因此,只要 ALEXI 模型估算出当天实际蒸散 ET ,即可反推同期遥感影像中的土壤湿度状况。

4) Gap-Filling 技术。ALEXI 模型提出了一种可以填补云体覆盖区域蒸散通量的简便方法。首先,根据遥感数据得到当日累计地表蒸散($\langle E \rangle$),该步骤无论晴空、云天条件都可实现;在晴空条件下(式6),ALEXI 模型利用土壤水分估算模块反推当日实际可用水分(AW),再从当日实际可用水分(AW)中扣除水分耗损(即当日地表蒸散 $\langle E \rangle$),就可得到隔日的实际可用水分(AW_{next}):

$$f_{\text{PET}} = \frac{\langle E \rangle}{\langle PET \rangle}$$

$$f_{\text{AW}} = f_n^{-1}[f_{\text{PET}}]$$

$$AW = f_{\text{AW}} \cdot AWC$$

$$AW_{\text{next}} = AW - \langle E \rangle \quad (6)$$

若是云天条件,则将前一天(晴空条件)估算得到的当日实际可用水分(AW)代入土壤水分估算模块,反推当日累计地表蒸散($\langle E \rangle$),并继续利用当日耗损,推算隔日水分状况(AW_{next})(式7)。该步骤重复进行,直到下一次晴空条件出现:

$$f_{\text{AW}} = \frac{AW}{AWC}$$

$$f_{\text{PET}} = f_n[f_{\text{AW}}]$$

$$\langle E \rangle = f_{\text{PET}} \cdot \langle PET \rangle$$

$$AW_{\text{next}} = AW - \langle E \rangle \quad (7)$$

Gap-Filling 技术假设,即使土壤水分变化时,每天的 f_{PET} 也都处于较稳定的状态(Brutsaert & Chen, 1996)。因此,该技术仅是对云区蒸散状况的一种推算,要想获取真实的地表水分条件,只有等到雨后的第一次晴空条件出现。

3.2 ALEXI 模型特征

以往双层模型在估算地表通量时,都需要近地层气温数据作为数据源之一。因此,当开展区域蒸散研究时,需对站点气温数据进行空间插值,使之与其他遥感数据空间分辨率一致,这就增加了模型结果的误差(宋小宁, 2004)。而 ALEXI 模型耦合了 TSEB 模型和简化边界层模型,可直接估算地表气温状况,完成对地表辐射温度的组分分解,以及组分通量的估算,这是 ALEXI 模型的最大特色和创新。由于 ALEXI 属于双层模型,它将地表蒸散分解为作物蒸腾和土壤蒸发,因此它的地表水分估算模块可根据土壤、冠层通量估算土壤表层和作物根部水分状况,这对监测作物生长状况、预测作物产量具有重要的现实意义。同时,地球静止卫星的全天候遥感观测数据使 ALEXI 模型能够不间断的反演研究区蒸散,从而更加准确地了解区域蒸散的日变化规律。另外,在 ALEXI 模型基础上,不断改进并建立的 Dis-ALEXI(Disaggregated-ALEXI)模型(Anderson *et al.*, 2004, 2007b),将原来 ALEXI 模型 5 ~ 10 km 分辨率的估算结果提高到 60 m ~ 1 km 分辨率水平,获取了更加精细的区域蒸散和地表水分分布产品信息。

ALEXI 模型也存在一些有待改进的地方:(1)与所有热红外遥感模型一样,ALEXI 模型受云的影响也较大,主要解决途径是依靠地球静止卫星的云产品。由于云产品在夜间(依赖于红外波段)和白天(依赖于可见光波段)有不同的算法,当黎明时刻两种算法进行替换时,某些云体在一定大气条件下无法被识别,这将导致模型结果出现较大偏差。除了提高云产品的算法,还可结合其他信息,例如,将静止卫星获取的每小时日照与晴空条件下的反照率估计值进行对比,改进清晨的云检验效果(Anderson *et al.*, 2007a)。(2)大气平流对遥感蒸散模型的影

响不可忽视。研究表明,若将模型最佳运行时间限定为上午,平坦地势条件下平流和大尺度气候背景对估算结果的影响并不显著,但在山区该方法的作用并不明显(Anderson *et al.*, 1997)。因此,可以考虑在模型计算过程中添加平流校正项或引入中尺度预报模式进行校正(Diak & Whipple, 1993)。(3) ALEXI 模型中的潜在蒸散,是基于 Priestley-Taylor 近似得到的。当水汽压差较大时,该近似算法会低估土壤组分的潜热通量。在以后的研究中,应将 P-T 系数定义为水汽压差或冠层传导的函数,随地理位置的不同而改变,使估算结果更加合理准确。(4) Gap-Filling 模块根据当地最后一次晴空条件下的土壤水分信息开展云区蒸散状况的推算。若云区出现降水情况,改变地表水分,必然导致推算结果(蒸散量、实际可用水分)偏离实际状况。以后的研究应当考虑云区可能降水量,对其进行改进。(5) 关于瞬时通量的时间拓展问题,研究表明,采用蒸发比不变法推算的日蒸散量往往会比实测值偏低 5%~10%, ALEXI 模型对此的改进只是增加了一个经验系数。在模型的后续研究中,还应提出更加合理的算法,增加模型估算精度。

4 ALEXI 模型在农业干旱监测中的应用展望

近年来,在以全球变暖为主要特征的气候变化背景下,区域极端天气气候事件增多、增强,干旱等农业气象灾害已对全球及中国的粮食生产造成很大威胁。各国已从水文、气象和农业等角度开展了干旱监测的相关研究,提出了多种干旱监测指标和方法,分属于气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱。其中农业干旱指的是土壤供水与作物需水收支不平衡的现象,一般采用降水量指标、土壤含水量指标、作物干旱指标(如作物水分亏缺指数)及综合类指标(如帕默尔水分亏缺指数)等来评价(王密侠等, 1998)。而事实上,社会公众最关心的干旱也正是由于土壤湿度长时间低于农作物承受程度而造成的农业干旱,因此,土壤湿度才是监测农业干旱最可信的指标。但全国仅有 640 个农业气象观测站和 1504 个土壤墒情观测站,其对土壤湿度的监测存在站点分布稀疏、观测时间间隔过长的问题,从而导致其空间代表性差和信息发布不及时缺陷。

随着遥感技术的迅速发展,多时相、多光谱遥感数据从定性、定量等方面提供了大范围的地表信息,为实时动态的农业干旱监测开辟了全新途径。目

前,基于遥感手段的农业干旱监测指标主要有基于地表反射率、发射率的干旱指数(植被状态指数、温度状态指数和温度植被干旱指数等),以及基于地表水分和能量平衡模型的干旱指数(热惯量模型、蒸发比指数和作物缺水指数等)(侯英雨等, 2007)。然而,目前较为常用的这些农业干旱遥感监测指标,大多只能了解地表某一深度的水分状况。事实上,土壤表层和深层(作物根部)的水分具有不同的耗散周期,而且分别受土壤蒸发和作物蒸腾的影响(Porte-Agel *et al.*, 2000)。本文介绍的 ALEXI 模型能够近实时地反演区域内不同时空尺度的土壤表层和作物根部水分状况,较以往遥感监测方法得到的地表水分信息更加细致、全面。基于 ALEXI 模型得到地表实际蒸散(E)和潜在蒸散(PET),可以建立蒸散胁迫指数(ESI),该指数与帕默尔干旱指数相比较,其月值距平有很好的时空一致性,且空间分辨率更高(Anderson *et al.*, 2007b)。此外, ALEXI 模型可以分别得到地表胁迫指数(ESI_s)和冠层胁迫指数(ESI_c),由于土壤表层对于降水反应敏感,因此 ESI_s 能很好地指示气象干旱;而 ESI_c 与深层土壤水分关系密切,更适合指示农业干旱。目前, ALEXI 模型已经实现美国全境的日地表蒸散的实时反演,并基于该模型生产了美国干旱监测产品。

目前,中国农业干旱的国家级监测预警业务尚还处于起步阶段,“十五”期间中国气象科学研究院等有关专家对华北等地的农业干旱预警技术进行了研究。近年来,国家气象中心和一些省、区气象局先后将部分农业干旱预测与预报的研究成果进行了业务应用研究。2007 年和 2008 年国家气象中心分别组织开展了农业干旱监测业务技术研究和农业干旱预报系统建设,取得了一定的进展。但是,要增强农业干旱灾害防灾减灾能力,充分保障中国的粮食生产安全,提供准确、实时的农业干旱监测产品,还需不断改进和提高农业干旱监测技术并开展日常业务运行。而针对前文所述 ALEXI 模型的特点及我国农业干旱监测技术的应用现状,有必要将该模型引入到中国的干旱监测研究及业务服务中,实时监测不同层次土壤的湿度状况并进行农业干旱监测产品的实时发布。同时,还可以考虑以 ALEXI 模型的蒸散胁迫指数为基础,融合多元遥感数据(FY-3、微波等),结合 GDAS 大气驱动数据,利用中国陆面数据同化系统,估算地表水分状况,生产农业、水文干旱监测产品,并参考“全国旱涝气候监测、预警系统”

的气象干旱监测产品,发布中国的干旱监测、预警信息。因此,ALEXI 模型在我国干旱监测中开展应用,必然显著提升中国的农业、水文干旱监测和预警水平及其公信力,也对合理利用地表水资源,科学指导农业生产具有重要的现实意义。

参考文献

- 高彦春,龙 笛. 2008. 遥感蒸散发模型研究进展. 遥感学报, **12**(3): 515–528.
- 侯英雨,何延波,柳钦火,等. 2007. 干旱监测指数研究. 生态学杂志, **26**(6): 892–897.
- 李召良,Stoll MP,张仁华,等. 2000. 利用 ATSR 数据分解土壤和植被温度的研究. 中国科学(E 辑), **30**(增刊): 27–38.
- 刘雅妮,武建军,夏 虹,等. 2005. 地表蒸散遥感反演双层模型的研究方法综述. 干旱区地理, **28**(1): 65–71.
- 宋小宁. 2004. 基于植被蒸散法的区域缺水遥感监测方法研究(博士学位论文). 北京:中国科学院遥感应用研究所.
- 王密侠,马成军,蔡焕杰. 1998. 农业干旱指标研究与进展. 干旱地区农业研究, **16**(3): 119–124.
- 王娅娟,孙丹峰. 2005. 基于遥感的区域蒸散研究进展. 农业工程学报, **21**(7): 162–167.
- 辛晓洲,田国良,柳钦火. 2003. 地表蒸散定量遥感的研究进展. 遥感学报, **7**(3): 233–240.
- Peixoto JP, Oort AH(吴国雄等译). 1995. 气候物理学. 北京:气象出版社.
- Anderson MC, Kustas WP, Norman JM. 2007. Upscaling flux observations from local to continental scales using thermal remote sensing. *Agronomy Journal*, **99**: 240–254.
- Anderson MC, Norman JM, Diak GR, *et al.* 1997. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, **60**: 195–216.
- Anderson MC, Norman JM, Mecikalski JR, *et al.* 2004. A multi-scale remote sensing model for disaggregating regional fluxes to micrometeorological scales. *Journal of Hydrometeorology*, **5**: 343–363.
- Anderson MC, Norman JM, Mecikalski JR, *et al.* 2007a. 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*, **112**: D10117.
- Anderson MC, Norman JM, Mecikalski JR, *et al.* 2007b. 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*, **112**: D11112.
- Bastiaanssen WGM, Ahmad MD, Chemin Y. 2002. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. *Water Resources Research*, **38**: 9.1–9.9.
- Bastiaanssen WGM, Menenti M, Feddes RA, *et al.* 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, **212/213**: 198–212.
- Bastiaanssen WGM. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, **229**: 87–100.
- Blyth EM, Harding RJ. 1995. Application of aggregation model to surface heat flux from the Sahelian tiger bush. *Agricultural and Forest Meteorology*, **72**: 213–215.
- Bowen IS. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, **27**: 779–787.
- Brown KW, Rosenberg NJ. 1973. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field. *Agronomy Journal*, **65**: 199–209.
- Brutsaert W, Chen D. 1996. Diurnal variation of surface fluxes during thorough drying (or severe drought) of natural prairie. *Water Resources Research*, **32**: 2013–2019.
- Brutsaert W, Sugita M. 1992. Application of self-preservation in the diurnal evolution of the surface energy budget to determine daily evaporation. *Journal of Geophysical Research*, **97**: 18377–18382.
- Campbell GS, Norman JM. 1998. An introduction to environmental biophysics. New York: Springer-Verlag.
- Crago RD. 1996. Comparison of the evaporative fraction and the Priestley-Taylor alpha for parameterizing daytime evaporation. *Water Resources Research*, **32**: 1403–1409.
- Diak GR, Whipple MS. 1993. Improvements to models and methods for evaluating the land-surface energy balance and ‘effective’ roughness using radiosonde reports and satellite-measured skin temperature data. *Agricultural and Forest Meteorology*, **63**: 189–218.
- France J, Thornley JHM. 1984. Mathematical Models in Agriculture. London, Butterworths.
- Hall FG, Huemmrich KF, Gcetz SJ, *et al.* 1992. Satellite remote sensing of surface energy balance: Success, failures, and unresolved issues in FIFE. *Journal of Geophysical Research*, **97**: 19061–19089.
- Jackson RD, Reginato RJ, Idso SB. 1977. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resource Research*, **13**: 651–656.
- Kustas WP, Choudhury BJ, Moran MS, *et al.* 1989. Determination of sensible heat flux over sparse canopy using thermal infrared data. *Agricultural and Forest Meteorology*, **44**: 197–216.

- Lhomme JP, Chehbouni A. 1999. Comments on dual-source vegetation-atmosphere transfer models. *Agricultural and Forest Meteorology*, **94**: 269–273.
- McNaughton KG, van den Hurk BJJM. 1995. A ‘Lagrangian’ revision of the resistors in the two-layer model for calculating the energy budget of a plant canopy. *Boundary-Layer Meteorology*, **74**: 261–288.
- Mecikalski JR, Diak GR, Anderson MC, *et al.* 1999. Estimating fluxes on continental scales using remotely sensed data in an atmospheric-land exchange model. *Journal of Applied Meteorology*, **38**: 1352–1369.
- Monteith JL. 1973. Principles of Environmental Physics. London: Edward Arnold.
- Norman JM, Kustas WP, Humes KS. 1995. A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, **77**: 263–293.
- Penman HL. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **193**: 120–145.
- Porte-Agel F, Parlange MB, Cahill AT, *et al.* 2000. Mixture of time scales in evaporation: Desorption and self-similarity of energy fluxes. *Agronomy Journal*, **92**: 832–836.
- Sanchez JM, Scavone G, Caselles V, *et al.* 2008. Monitoring daily evapotranspiration at a regional scale from Landsat-TM and ETM⁺ data: Application to the Basilicata region. *Journal of Hydrology*, **351**: 58–70.
- Shuttleworth WJ, Gurney RJ. 1990. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **116**: 794–519.
- Shuttleworth WJ, Wallace JS. 1985. Evaporation from sparse crops: An energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **111**: 839–855.
- Stewart JB, Verma SB. 1992. Comparison of surface fluxes and conductances at two contrasting sites within the FIFE area. *Journal of Geophysical Research*, **97**, 18623–18628.
- Stewart, JB, Kustas WP, Humes KS, *et al.* 1994. Sensible heat flux-radiometric surface temperature relationship for eight semiarid areas. *Journal of Applied Meteorology*, **33**: 1110–1117.
- Su Z. 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, **6**: 85–100.
- Tasumi M, Treezza R, Allen RG, *et al.* 2005. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U. S. *Irrigation and Drainage Systems*, **19**: 355–376.
- Thornthwaite CW, Holzman A. 1944. Report of the commutation on transpiration and evaporation. *Transactions of the American Geophysical Union*, **25**: 683–693.
- Troufleau D, Lhomme JP, Monteny B, *et al.* 1997. Sensible heat flux and radiometric surface temperature over sparse Sahelian vegetation. I. An experimental analysis of the kB^{-1} parameter. *Journal of Hydrology*, **188/189**: 815–838.
- Wallace JS. 1997. Evaporation and radiation interception by neighbouring plants. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **123**: 1885–1905.
- Wang J, Bastiaanssen WGM, Ma Y, *et al.* 1998. Aggregation of land surface parameters in the oasis-desert systems of north-west China. *Hydrological Processes*, **12**: 2133–2147.
- Zhang L, Lemeur R. 1995. Evaluation of daily evapotranspiration estimates from instantaneous measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, **74**: 139–154.

作者简介 郑有飞,男,1959年生,博士,教授,博士生导师。主要从事应用气象领域的相关研究。E-mail: zhengyf@nuist.edu.cn

责任编辑 李凤芹
