

遥感技术在区域农田蒸散研究中的应用

李星敏^{1,2}, 卢玲¹, 杨文峰³, 黄春林¹

(1 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 陕西省经济作物气象服务台, 陕西 西安 710015; 3 陕西省气象台, 陕西 西安 710015)

[摘要] 蒸散发在地表水分循环和能量平衡中具有重要作用, 其估算方法研究一直是人们关心的热点问题。文章在对能量平衡、水分平衡、互补相关理论及土壤-植被-大气传输模型的多种蒸散发估算方法分析的基础上, 就估算蒸散发的各种方法的优缺点进行了分析; 详细讨论了遥感技术用于蒸散发计算的统计模型、物理模型和全遥感信息模型, 以及国内在能量平衡余项法、SEBAL 模型、SEBS 模型等方面取得的研究进展。结果表明, 遥感技术在区域蒸散的估算方面具有其他方法不可比拟的优点, 虽然遥感技术用于区域蒸散在模型研建和检验、尺度外推、反演精度等方面还存在问题, 但遥感技术仍然是解决区域蒸散估算的重要方向。

[关键词] 遥感技术; 农田蒸散; 区域蒸散; 蒸散量估算

[中图分类号] TP79; S161.4

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2009)08-0161-10

Utilization of remote sensing for regional field evapotranspiration estimation

LI Xing-min^{1,2}, LU Ling¹, YANG Wen-feng³, HUANG Chun-lin¹

(1 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences,

Lanzou, Gansu 730000, China; 2 Shaanxi Meteorological Service Observatory for Economic Crops,

Xian, Shaanxi 710015, China; 3 Shaanxi Meteorology Observatory, Xi'an, Shaanxi 710015, China)

Abstract: Evapotranspiration has an important role in the water and energy balance and circulation. The method of estimation evapotranspiration is a hot issue for research workers. Based on the theory of energy balance, water balance and complementary relationship and soil-vegetation-atmosphere transferation model, many methods of estimating evapotranspiration have been developed. This paper analysed the advantages and disadvantages of these methods, discussed in detail the models including statistical and empirical model, physical model and remote sensing information model by using remote sensing technology to calculate evapotranspiration at regional scale. The paper also demonstrated the research progress of some models, such as residual item of energy balance equation, surface energy balance algorithm for land(SEBAL), surface energy balance system(SEBS) in China. The results show remote sensing technology has its special advantages on estimation evapotranspiration at regional scale. Although such problems, as making models at regional scale, evaluation of model applicability, temporal and spatial resolution with relative scale extension, accuracy assessment and so on exist, the utilization of remote sensing for regional evapotranspiration estimation is still an important trend.

Key words: remote sensing technology; field evapotranspiration; regional evapotranspiration; evapotranspiration estimation

* [收稿日期] 2008-11-21

[基金项目] 国家自然科学基金项目(40871190; 40801126)

[作者简介] 李星敏(1968—), 女, 甘肃酒泉人, 高级工程师, 硕士, 主要从事遥感与应用气象研究。E-mail: lixingmin803@163.com

1802年,英国的道尔顿(Dalton)根据水面蒸发形成原理和维持机理,提出了道尔顿蒸发定律的早期水面蒸发模型,该模型对近代蒸发理论的创立起到了重要作用^[1]。1926年,波文(Bowen)从能量平衡方程出发,提出了波文比能量平衡模型,为蒸散的计算奠定了基础^[2]。1948年,英国物理学家 Penman 首次提出运用空气动力学与能量平衡相结合的方法计算水面蒸发量^[3];此后, Monteith 引入表面阻抗的概念,从而导出了 Penman-Monteith (P-M)公式,为非饱和下垫面的蒸发研究开辟了一条新的途径^[4]。近年来,随着植物微气象学的发展,出现了一些更加确定性的机理模型,这些模型一般称为土壤-植被-大气传输模型(SVAT models)^[5-6],由于其详尽地描述了土壤和植被冠层的各种过程,可以很方便地与气候、水文等模型连接。

在实际中,往往需要掌握区域内的蒸发分布和总的耗水动态,所以区域蒸发量的估算就显得尤为重要,传统方法需要假设地表覆盖类型均一,结构均匀,但在大区域的观测计算中,这类条件很难得到满足。近年来,随着遥感技术的发展,遥感资料日益丰富,加之遥感特有的高空间分辨率特点,使得遥感方法在区域蒸散的计算方面显示出明显的优越性。

目前,计算区域蒸散已有很多方法,在能量平衡原理、水量平衡原理、互补相关理论、土壤-植被-大气传输理论和参考作物蒸散发等理论的支持下,已建立了研究区域蒸散发的多种模型。其中参考作物模型和互补相关模型只需要气象资料就可以计算蒸散,但计算区域蒸散需要考虑模型的适用性。能量平衡模型具有完善的理论基础,但需要较多的模型参数和地表特征参数,使模型的使用受到限制。遥感技术可以反演许多地表特征参数,利用遥感信息可以反演出区域蒸散,是估算大范围区域蒸散的重要方向。本文试图通过对这些模型的综合评述,为研究区域蒸散发理论和方法的选择提供参考,并为农田区域蒸散的进一步研究提供借鉴。

1 计算模型

1.1 参考作物蒸散的计算方法

王菱等^[7]研究表明,农田实际蒸散受到天气因素、土壤湿度和作物生物学特性的影响,可表示为:

$$E_a = f_1(S, K_c) \cdot E_0 \quad (1)$$

式中: E_a 为农田实际蒸散量, $f_1(S, K_c)$ 为与土壤水分含量 S 和作物生物学特征量 K_c 有关的函数, E_0 就是通常所说的参考作物蒸散。通过参考作物蒸散

即可以获得农田实际蒸散。

过去的50年中,世界各地的科研工作者提出了许多适于不同气候条件的参考作物蒸散量计算公式,但是由于这些方法的局限性很大,很难在全球范围内广泛应用。1965年, Monteith 在 Penman 的基础上提出了修正的 Penman-Monteith 公式^[4],该公式考虑了冠层阻力和空气动力学阻力,为了便于使用, Allen 等^[8]利用赋予参考作物冠层阻力和高度固定值的方法,将参考作物定义为生长一致、水分充足、高度为12 cm、冠层阻力为70 m/s、反射率为0.23、能完全覆盖地面的绿色草丛植被。根据这一定义,世界粮农组织将其定义为 FAO Penman-Monteith 公式。FAO-17 Penman 修正式和 FAO Penman-Monteith 公式是目前使用较为普遍的估算参考作物蒸散的方法。

Penman-Monteith 公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G_0) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

式中: Δ 为饱和水汽压-温度曲线斜率, R_n 为净辐射通量, G_0 为土壤热通量, γ 为干湿球常数, T 为气温, U_2 为2 m高度处的风速, e_a 为饱和水汽压, e_d 为实际水汽压。

FAO-17 Penman 修正式为:

$$ET_0 = \frac{\frac{P_0}{P} \times \frac{\Delta}{\gamma} R_n}{\frac{P_0}{P} \times \frac{\Delta}{\gamma} + 1} + \frac{0.26(e_a - e_d)(1 + cU_2)}{\frac{P_0}{P} \times \frac{\Delta}{\gamma}} \quad (3)$$

式中: P 为海拔高度 H 处的气压, P_0 为海平面气压, c 为修正系数。

国内已有一些学者对不同地区各种参考作物蒸散计算方法的计算结果进行了比较研究^[9-12],结果表明:这些计算结果既具有一定的差异,又呈显著的线性相关,在不同地区计算结果的差异不同。参考作物蒸散方法的优点是仅通过气象观测资料即可计算参考作物蒸散,进而得到作物蒸散,如果要得到面的蒸散,则还需要气象观测站网资料,且观测点要有足够的代表性。

1.2 基于能量平衡的模型

1.2.1 单层模型 单层模型主要采用能量余项法。能量余项法的基本思想是:先求出能量平衡方程中的净辐射、土壤热通量、感热通量,在不考虑平流作用和生物体内需水的情况下,将潜热通量作为能量

平衡方程的余项进行估算。

单层模型将能量界面当作一个整体,对土壤和植被不作区分,其估算潜热的热量平衡方程为^[13]:

$$\lambda E = R_n - G_0 - H. \quad (4)$$

式中: λE 为潜热通量, R_n 为净辐射通量, G_0 为土壤热通量, H 为感热通量, H 由下式计算:

$$H = \rho C_p \frac{T_{\text{aero}} - T_{\text{air}}}{r_{\text{aa}}}. \quad (5)$$

式中: ρ 为空气密度, C_p 为空气定压比热, T_{aero} 为蒸散发表面的动力学温度($^{\circ}\text{C}$), T_{air} 为参考高度处的气温($^{\circ}\text{C}$), r_{aa} 为参考高度处的空气动力学阻抗。空气动力学阻抗随地表风速、地表粗糙度和大气稳定度等因素的变化而变化,可以根据 Monin-Obuhkov 相似理论进行计算^[14-15]。目前,对单层模型的研究主要集中在蒸散发表面的空气动力学温度与参考高度处的气温差和阻抗的计算上,如 Kustas 等^[16]用辐射温度代替上式中的空气动力学温度;Troufleau 等^[17]通过试验确定空气动力学温度与地表温度差异的经验系数,然后通过地表温度求取空气动力学温度。单层模型由于将植被作为整层来研究,在地表植被覆盖度较高且均一时效果较好,但用于计算稀疏植被上的感热和潜热通量时,经常会高估感热通量^[18]。解决的办法通常是在式(5)右边的分母上增加附加阻抗 r_{ex} ,即有:

$$H = \rho C_p \frac{T_{\text{aero}} - T_{\text{air}}}{r_{\text{aa}} + r_{\text{ex}}}. \quad (6)$$

单层模型由于参数较少,已被广泛用于大尺度的气候和生态系统中,但单层模型只在地面覆盖较好、低矮植被条件下适用,且不能描述土壤和植被在能量传输过程中的差异。

1.2.2 双层模型 经典的双层模型首先由 Shuttleworth 等^[19]提出,即 Shuttleworth-Wallace(S-W 模式)。该模型的基本思想是:水汽和热量的 2 个源是互相叠加的,底层的水与热量只能通过顶层离开或进入,整个冠层发散的总感热通量是各层感热通量之和。模型的表达式为:

$$H = H_s + H_v = \rho C_p \frac{T_{\text{aero}} - T_{\text{air}}}{r_{\text{aa}}}. \quad (7)$$

式中: H_s 和 H_v 分别是土壤和植被的感热通量。土壤和植被对感热通量的贡献,依据梯度扩散理论可以表示为^[20]:

$$H_s = \rho C_p \frac{T_s - T_{\text{aero}}}{r_{\text{as}}}, \quad (8)$$

$$H_v = \rho C_p \frac{T_v - T_{\text{aero}}}{r_{\text{af}}}. \quad (9)$$

式中: T_s 和 T_v 分别为土壤和植被的温度($^{\circ}\text{C}$), r_{as} 为土壤表面的热传输空气动力学阻抗, r_{af} 为叶面边界层阻抗。

此后,许多学者根据各自的研究目标对 S-W 模式进行了深入研究^[21-23]。双层模型可分为分层模型和分块模型 2 种。分层模型是指土壤层在冠层下,双层互相重叠。当双层有耦合关系时,称为系列模型(series model),如 Shuttleworth-Wallace 模型;当双层无耦合关系时,称为平行模型(parallel model)^[24]。而分块模型^[25]土壤是裸露的,植被像补丁一样缀在土壤表面,不同的通量源像马赛克或补丁并列放置,各通量源只有与空气的垂直作用,而无相互作用。

在分层模型(耦合模式)中,总通量为组分通量的简单相加;而在分块模型(补丁模式)中,总通量为组分通量的面积权重之和^[26],因为组分通量是单位组分面积的平均通量值,而非单位地表面积的平均通量值,故不能简单相加^[27]。

与单层模型相比,双层模型将植被与土壤分开考虑,更接近于实际应用,但由于模型需要输入较多的参数,降低了其实用性。此外还有积分双源模式、双温度差分双源模式等^[28]。

1.2.3 多层模型 一些研究将冠层分成若干层,分别计算各层的通量并累加得出整个冠层的通量,这种模型虽具有完善的理论基础,但需要更多模型参数和大量的地表特征参数,因而使用受到限制。

1.3 互补相关模型

Bouchet^[29]于 1963 年提出了陆面实际蒸散与可能蒸散之间的互补相关原理,开辟了区域蒸散量计算的新途径。此类模型只需用常规气象资料,可以在气象观测站网的基础上作大范围蒸散计算。

互补相关原理认为,当区域全部为湿润时,实际蒸散发 ET_a 和可能蒸散发 ET_p ,均等于湿润条件下的陆面蒸散发量 ET_w (即 $ET_a = ET_p = ET_w$)。当实际蒸散发 ET_a 小于 ET_w 时,可能蒸散发 ET_p 就有相应的增加,此时可能蒸散发的增加量等于实际蒸散发的减少量。Morton^[30]用大量的试验数据证明了局地蒸发潜力与实际蒸散发之间的互补关系确实存在。

在利用互补相关方法计算实际蒸散发量时,由于推求 ET_w 和 ET_p 的思想不同,也相应形成了不同的模型,如 Morton^[30]提出的 CRAE (Complementary Relationship Area Evapotranspiration) 模型、Brutsaert 等^[31]提出的平流-干旱(Advection-

Aridity, AA) 模型和 Granger 提出的 Granger 模型^[32-33]等。

刘绍民等^[34]分析了上述 3 种模型在黄河流域的适用性,结果表明,在湿润和干旱条件下,互补相关模型计算误差都比较大。CRAE 模型、AA 模型和 Granger 模型的系数在不同年型、不同气候类型区域有不同取值。也有一些研究认为,模型在半干旱和干旱地区应用结果不太理想,而在温带湿润和亚热带湿润地区应用效果较为理想^[35]。可见,模型在不同地区应用时,应首先进行适用性分析。

2 基于遥感技术的区域蒸散估算模型及其评述

近年来,随着遥感技术的飞速发展,卫星获得信息的空间、时间和光谱分辨率不断提高,从可见光、近红外和热红外等多个波段可以反演一些地表特征参数,如地表反射率、植被覆盖、地表温度、叶面积指数等,使遥感技术在区域范围蒸散的计算中得到迅速推广应用,为蒸散的估算从农田走向区域奠定了基础。遥感技术用于估算区域蒸散的模型可分为统计和经验模型、物理模型、数值模型及全遥感信息模型。

2.1 统计和经验模型

统计经验方法将站点通量观测与遥感观测相结合,利用已有观测拟合热通量与遥感参量之间的关系,然后计算区域潜热通量。如 1977 年 Jackson 等^[36]提出的简化法,其表达式为:

$$R_{n24} - LE_{24} = B(T_{013} - T_{a13})^n. \quad (10)$$

式中: R_{n24} 和 LE_{24} 分别是 24 h 时间段的总净辐射和蒸散量; T_{013} 和 T_{a13} 分别是当地时间 13:00 的表面辐射温度和气温; B 和 n 为经验参数,由植被指数(NDVI)的函数确定。

Bella 等^[37]利用 NOAA/ AVHRR 资料,拟合了日平均地表蒸散发与植被指数(NDVI)和地表温度(T_s)的关系:

$$ET = -0.88.3439 + 1.77636T_s + 286.406NDVI. \quad (11)$$

还有一些经验模型^[38],在此不再列举。经验模型通过影响蒸发的因素拟合获得蒸散,虽然经验模型受局地因子影响很大,但这些经验公式也给研究提供了思路与解决问题的途径。

2.2 物理模型

利用遥感反演地表蒸散的物理基础是地表能量平衡,将潜热通量作为能量平衡的余项求出,具体步

骤为:利用遥感图像结合地表观测信息计算地表净辐射、土壤热通量及感热通量,通过能量平衡方程将潜热通量作为余项求出,即将单层模型、双层模型由点的信息通过遥感信息进一步拓展到面上。

利用遥感技术反演地表蒸散的模型中较典型的是荷兰 Bastiaanssen 等^[39-40]开发的基于遥感的陆面能量平衡计算模型(Surface energy balance algorithm for land, SEBAL 模型)和荷兰籍华人苏中波^[41]提出的陆面能量平衡系统(Surface energy balance system, SEBS)模型,这 2 个模型实际上均是单层模型,在处理显热通量时有各自不同的方法。

2.2.1 SEBAL 模型与瞬时蒸散的计算^[39-40] 在地表能量平衡方程式: $\lambda E = R_n - G_0 - H$ 中,各物理量的计算公式如下。

(1)地表净辐射通量 R_n 的计算公式为:

$$R_n = (1 - \alpha_0)K \downarrow + \epsilon_0 \cdot L \downarrow - \epsilon_0 \cdot \sigma \cdot LST_0^4. \quad (12)$$

式中: α_0 是地表反照率, $K \downarrow$ 为向下的短波辐射, $L \downarrow$ 为向下的长波辐射, ϵ_0 为地表发射率, σ 为斯蒂芬-波耳兹曼常数, LST_0 为地表温度(K)。

(2)在 SEBAL 模型中,土壤热通量的计算公式为:

$$G_0/R_n = \frac{T_s}{\alpha_0} (0.0032\alpha_0 + 0.0062\alpha_0^2) \times (1 - 0.978NDVI^4). \quad (13)$$

式中: T_s 为地表温度($^{\circ}\text{C}$)。

(3) H 的计算公式为:

$$H = \rho C_p \frac{T_{aero} - T_{air}}{r_{oa}}. \quad (14)$$

式中各符号的意义同上,其中:

$$r_{oa} = \frac{\{\ln[(Z_h - d_0)/Z_{oh}] - \psi_h\}}{ku^*}. \quad (15)$$

式中: Z_h 为空气温度和湿度测量时的参考高度, d_0 为零平面位移高度, Z_{oh} 为热量粗糙长度, ψ_h 为热力传输稳定度函数, k 为卡曼常数(一般取 0.41), u^* 为摩擦风速。

对 u^* 有下式:

$$\frac{u_z}{u^*} = \frac{\{[(Z_m - d)/Z_{om}] - \psi_m\}}{k}. \quad (16)$$

式中: u_z 为 Z_m 高度上所测量的风速, Z_m 为风速测量高度, Z_{om} 为动量输送的表面粗糙长度, ψ_m 为动量输送的稳定函数。

在非稳定和稳定层结下,带入上式后可得空气动力学阻抗表达式为:

$$r_{au} = \frac{\{\ln[(Z_h-d)/Z_{oh}] - \psi_h\} \cdot \{[(Z_m-d)/Z_{om}] - \psi_m\}}{k^2 u_z} \quad (17)$$

在中性层结下, $\psi_h = \psi_m = 0$, 则空气动力学阻抗的表达式为:

$$r_{au} = \frac{\ln[(Z_h-d)/Z_{oh}] \cdot [(Z_m-d)/Z_{om}]}{k^2 u_z} \quad (18)$$

SEBAL 模型通过在图像上选择“极冷点”(植被覆盖度高, 地表温度最低, $H \approx 0$)和“极热点”(植被覆盖度低, 地表温度最高, $\lambda E \approx 0$), 利用“热点”、“冷点”及气温同空气动力学的温差与地表辐射温度的线性关系, 求得回归系数, 进而求得初始的感热通量 H , 通过迭代得到稳定的 H , 最后由余项法求得蒸散。

2.2.2 SEBS 模型与瞬时蒸散的计算^[41-42] SEBS 模型也是基于能量平衡的单层模型, 同前述一样, 可通过遥感图像反演地表参数, 计算出地表净辐射 R_n 和土壤热通量 G_0 , 与前述不同的是感热通量 H 的计算。

SEBS 的一个显著特点是定义了 kB^{-1} , 这里 B^{-1} 为无量纲的热传输系数。为估算 kB^{-1} 的值, SEBS 发展了下列模型:

$$kB^{-1} = \frac{kC_d}{4C_t \frac{u^*}{u(h)} (1 - e^{-n_{ec}/2})} f_c^2 + 2f_c f_s \frac{k \cdot u^* / u(h) \cdot z_{om} / h}{C_t^*} + kB_s^{-1} f_s^2 \quad (19)$$

式中: f_s 为土壤覆盖度, $f_s = 1 - f_c$; C_d 为叶片拖曳系数; C_t 为叶热传输系数, 取值范围为 $0.005 \leq C_t \leq 0.075$; $u(h)$ 为冠层高度处的水平风速; n_{ec} 为冠层内的风速剖面衰减系数; C_t^* 为土壤的热传输系数; f_c 为植被覆盖度; B_s^{-1} 为土壤的热传输系数。

SEBS 模型中可通过动力学传输粗糙度来估算热传输粗糙度高度, 这优于其他遥感通量估算模型中多采用固定值的做法, 减小了在大尺度非均匀地表中由于热量传输粗糙度的不准确所带来的误差, 因此也更适用于大区域尺度地表能量通量的估算^[42]。

热传输粗糙度高度可表示为动力学传输粗糙度 z_{om} 的函数关系, 即:

$$z_{oh} = z_{om} / \exp(kB^{-1}) \quad (20)$$

SEBS 的另一个特点是, 采用地表能量平衡指数法来确定蒸发比, 进而获得地表潜热通量。根据地表能量平衡原理, 在土壤水分亏缺的干燥地表环境下, 由于无可用土壤水分供给蒸发, 即潜热通量

(或蒸发) 约为零, 这时感热通量达到最大值。即 $\lambda E_{dry} = 0$ 时, 有:

$$H_{dry} = R_n - G_0 \quad (21)$$

式中: H_{dry} 为干燥地表环境下的感热通量。而在土壤水分充分供应的湿润地表环境下, 蒸发达到最大值, 这时感热通量为最小, 即:

$$\lambda E_{wet} = R_n - G_0 - H_{wet} \quad (22)$$

式中: λE_{wet} 、 H_{wet} 分别为湿润地表环境下的潜热通量和感热通量。相对蒸发 Λ_r 可表示为:

$$\Lambda_r = \frac{\lambda E}{\lambda E_{wet}} = 1 - \frac{\lambda E_{wet} - \lambda E}{\lambda E_{wet}} \quad (23)$$

将(21)和(22)式代入(23)式, 则相对蒸发可表示为:

$$\Lambda_r = 1 - \frac{H - H_{wet}}{H_{dry} - H_{wet}} \quad (24)$$

根据地表能量平衡指数(SEBI-Surface energy balance index)的定义, (24)式右边第二项即为 SEBI。定义蒸发比 Λ 为实际蒸散与可利用能量的比值, 即结合(23)式与 SEBI 的定义, 可得:

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{R_n - G_0} = \frac{\Lambda_r \cdot \lambda E_{wet}}{R_n - G_0} = (1 - SEBI) \frac{\lambda E_{wet}}{R_n - G_0} \quad (25)$$

获得蒸发比后, 则可利用(26)式求得实际潜热通量:

$$\lambda E = \Lambda (R_n - G_0) = (1 - SEBI) \lambda E_{wet} \quad (26)$$

何延波等^[42]利用该模型对黄淮海地区的地表能量通量进行了估算, 结果表明, 估算通量与观测结果相当一致, 可满足区域日蒸散计算的要求。

2.3 全遥感信息模型

2.3.1 热惯量方法 由于遥感对地表蒸散的反演主要是基于计算蒸散的物理模型, 涉及到大量的地表植被和气象参数, 其中有些参数并不能通过遥感得到。张仁华等^[43]抓住影响地表通量的最主要因子, 提出了微分热惯量的概念, 建立了一个既不需要土壤类型参数, 又不需要非遥感参数的地表通量遥感模型, 并成功地地对沙漠地区的感热和潜热通量进行了反演。

地表热惯量与波文比的信息转化模型为:

$$\beta = \frac{\lambda E}{H} = 0.66 \left[\frac{ATI_{max} - ATI_i}{ATI_i} \right] + \frac{\Delta + \gamma + \alpha \Delta}{\alpha \Delta} \quad (27)$$

式中: β 为波文比, ATI_{max} 为 1 d 中的最大热惯量,

ATI_i 是第 i 时刻的热惯量, Δ 为饱和水汽压-温度曲线的斜率, α 为试验系数。在没有平流影响的前提下, 地表蒸发潜热通量可通过波文比方法获得, 即:

$$\lambda E = \frac{R_n - G_0}{1 + \beta} \quad (28)$$

热惯量方法不再需要地表的非遥感数据, 使用卫星遥感数据可以独立地反演地表热通量。但热惯量方法只适于在地表为裸土的情况下使用, 故还需进一步发展地表有植被覆盖情况下的热惯量方法。

2.3.2 蒸散系数方法 蒸散系数的定义为 $\Lambda =$

$$\frac{\lambda E}{\lambda E + H} = \frac{\lambda E}{R_n - G_0}, \text{ 可以表示为 } \lambda E = \Lambda (R_n - G_0), \text{ 通}$$

过反演地表的净辐射通量、土壤热通量和蒸散系数, 即可获得蒸散发。蒸散系数在一些研究中也称为蒸发比, 如在上面提到的 SEBS 模型中。Willem 等^[44]介绍了 4 种通过遥感反演获得蒸散系数的方法, 其在对欧洲蒸散发的估算中, 认为以反照率与温度的反演方法效果较好, 其表达式为:

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{\lambda E + H} \approx \frac{LST_H - LST_0}{LST_H - LST_{AE}} \approx \frac{\alpha_H \cdot \alpha_0 + b_H - LST_0}{(\alpha_H - \alpha_{AE})\alpha_0 + (b_H - b_{AE})} \quad (29)$$

式中: LST_H 为干像元的地表温度(K), LST_{AE} 为湿像元的地表面温度(K), α_H 、 α_{AE} 分别为干、湿像元地表温度与其地表反照率函数的斜率, b_H 、 b_{AE} 分别为干、湿像元地表温度与其地表反照率线性函数的截距。可以通过绘制干、湿表面温度与其地表面反照率的点聚图, 拟合其上边界和下边界的线性方程, 通过线性方程得到所需要的斜率和截距。

蒸散系数方法可用于地表有植被覆盖的情况, 通过地表温度和反照率获得蒸散系数需要一定的经验, 在使用时需要注意。

3 国内区域蒸散估算的研究进展

国内利用遥感研究蒸散发虽然起步较晚, 但近年来已做了大量工作, 特别是在研建适用于农田系统和非均匀性地表的区域遥感蒸散发模型方面取得了长足进展。陈镜明^[45]提出了剩余阻抗的概念, 谢贤群^[46]认为日蒸散发量与任意时刻的蒸散量间存在正弦曲线关系, 这一研究成果使得由遥感估算的瞬时蒸散推算到了日蒸散。

在以能量平衡为基础、采用余项法计算蒸散方面, 主要是根据研究区域特点和观测资料对模型参数的分析, 得出了适合研究区域的参数计算方法, 且以单层模型的研究与应用较多。陈添宇等^[47]利用

NOAA/AVHRR 遥感资料反演值与地面观测值拟合的方法, 得到能量平衡各分量, 进而得到了中国西北地区东部 4~8 月的日蒸散量及其区域分布特征; 倪猛等^[48]利用 ETM 数据和地表热量平衡模型估算了洛河流域的蒸散发量; 乔平林等^[49]利用 MODIS 遥感数据反演了石羊河流域的蒸散发情况; 陈云浩等^[50]、詹志明等^[51]利用 NOAA/AVHRR 资料, 分别建立了裸土蒸发和植被覆盖蒸腾模型, 并利用植被覆盖度建立了非均匀陆面条件下的区域蒸散量遥感计算模型。

国内目前对双层模型的研究较少, 但也有一些具有代表性的成果, 如辛晓洲等^[52]基于两个假设对双层模型进行了简化; 隋洪智等^[53]将双层模型用于对西北干旱区干旱状况的评价, 并取得了较好结果; 刘雅妮等^[54]对双层模型存在的一些问题和难点进行了评述。

在 SEBAL 模型的研究与应用方面, 张万昌等^[55]采用 SEBAL 模型从 TM 影像上反演了黑河流域的蒸散发; 王介明等^[56]用 MODIS 及 TM 资料估算了黑河流域蒸散发; 潘卫华等^[57]遵循 SEBAL 模型, 给出了植被覆盖和裸土 2 种类型的区域蒸散(发)量计算模型, 并对泉州市的蒸散(发)量进行了反演。

在 SEBS 模型的研究与应用方面, 利用 NOAA 数据对黄河三角洲区域蒸散发量进行了较多研究^[58-60]。杨何群^[61]以 ASTER 为遥感数据源, 对肃南山地和张掖平原的感热通量和日蒸散发进行估算; 何延波等^[42, 62]重新确定了 SEBS 模式中的一些地表参数化方案, 建立了适用于黄淮海地区的 SEBS 模型。

遥感资料与土壤-植物-大气模型结合, 也是一种研究蒸散的重要方法。毛晓敏等^[63]运用土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 水热传输模型, 对冬小麦蒸散发过程进行了模拟; 刘树华等^[64]利用建立的土壤-植被-大气系统水分散失耦合模式, 研究了一定植被覆盖下区域近地面层的水分蒸散过程; 陈丹等^[65]利用分布式生态水文模型, 结合气温、降雨等资料和 MODIS 卫星遥感数据, 模拟分析了无定河流域的蒸散。

4 用遥感方法反演地表蒸散发中存在的问题及发展方向

4.1 模型的研究与应用方面

目前, 用遥感方法反演地表蒸散主要是以物理

模型为基础,部分参数通过气象观测站观测数据和生态观测资料获得。遥感获得的地表信息是一个面元信息,面元大小取决于遥感资料的分辨率,目前使用的不同遥感资料的分辨率有很大差异,从 NOAA/AVHRR 的 1.1 km 到 Aster 的 15 m,分辨率越高,混合像元越少。但模型都是针对某一特定下垫面建立的,下垫面不同,净辐射、土壤热通量、感热和潜热传输也不同。因此,研究区域蒸散时,应当根据研究目标和下垫面特征选用不同的模型、地表参数和遥感资料,以符合不同下垫面的热辐射传输特征。特别是当研究区域内下垫面特征具有显著差异时,在地理信息系统的支持下,分区建立反演模型,以获得整个区域内蒸散的合理分布,应该是估算区域蒸散的一个方向。另外,目前遥感反演的区域蒸散只是晴天的实际蒸散,如何通过模型和遥感技术获得阴天的蒸散,也是研究者们关心的问题。

4.2 精度评价方面

用遥感技术反演区域蒸散的物理模型中,模型本身需要通过遥感资料反演地表反射率、温度、植被覆盖、发射率等参数,反演过程中产生的误差,也可能叠加,也可能相互抵消,最好能在每个步骤中选择最佳的反演途径和先验知识控制,以使模型达到最优的计算效果。在蒸散的物理模型中,需要利用地面气象观测点和生态观测点的资料,如何将点的信息插值到面上,以及插值精度和地面观测资料的代表性等,均直接影响着利用模型计算区域蒸散的精度。另外,遥感资料空间分辨率的高低,研究范围的大小,混合像元的多少,都会对模型计算精度产生一定影响。模型计算精度的提高涉及到模型参数的各个方面。

4.3 尺度外推方面

用遥感技术反演地表蒸散时,涉及到 2 个方面的尺度:一个是空间尺度,另一个是时间尺度。遥感监测的是面元信息,物理模型是通过地面试验点建立的,将以点观测资料为基础建立的模型应用到区域尺度上时,需要考虑下垫面的均一性,根据下垫面特征选择合适的模型。同时,由于遥感信息是瞬时观测信息,因而需要将瞬时值转化为研究需要的日值。目前,由瞬时蒸散到日蒸散的推算方法主要有 2 种:一种是在晴朗天气条件下,农田蒸散的日变化曲线呈正弦变化形式^[46],可通过对该正弦关系进行积分得到日蒸散;另一种是利用蒸散系数,因为蒸散系数在当地时间 9:00~16:00 变化小,利用这种稳定性可由瞬时蒸散系数外推某一天的蒸散。根据不

同下垫面特征,由瞬时蒸散到日蒸散的推算仍然是今后研究的热点问题。

4.4 模型验证

由遥感技术反演出的蒸散代表了像元范围的平均蒸散值,NOAA/AVHRR 表示的是 1.1 km×1.1 km 范围的平均值,TM 是 30 m×30 m 的平均值,地面观测如波文比方法、涡动相关法等测的是点的信息,用点的信息验证面元信息就要求面元具有非常好的均一性,而分辨率越低的图像混合像元越多,因而其地面点的观测无法代表面的信息。闪烁通量仪被认为是一种能直接测量面元的显热通量仪器,将其用于通量的测量在国外只有 20 多年的历史,在我国只是刚刚起步。众多的研究文献表明^[66-67],闪烁通量仪在遥感像元尺度通量信息提取的验证、及在有平流或非均匀下垫面情况下,在大面积区域通量的研究中都是可靠和成功的。

[参考文献]

- [1] 闵 骞. 道尔顿公式的应用研究 [J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(1): 17-20.
Min Q. Research on the application of Dalton's formula [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2005, 25(1): 17-20. (in Chinese)
- [2] Bowen I S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface [J]. Phys Rev, 1926, 27: 779-787.
- [3] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. Proc Roy Soc, 1948, A193: 120-146.
- [4] Monteith J L. Evaporation and environment [J]. Symp Soc Exp Biol, 1965, 19: 205-234.
- [5] Mo X G, Liu S X, Lin Z H, et al. Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over the Lushi basin [J]. Journal of Hydrology, 2004, 285: 125-142.
- [6] 莫兴国, 刘苏峡, 于沪宁, 等. 冬小麦能量平衡及蒸散分配的季变化分析 [J]. 地理学报, 1997, 52(6): 536-542.
Mo X G, Liu S X, Yu H N, et al. Seasonal variation of energy budget and evapotranspiration partitioning in Wheat field [J]. Acta Geographica Sinica, 1997, 52(6): 536-542. (in Chinese)
- [7] 王 菱, 倪建华. 以黄淮海为例研究农田实际蒸散量 [J]. 气象学报, 2001, 59(6): 784-793.
Wang L, Ni J H. Research of actual evapotranspiration in Farmland: a case study in Huang-Huai-Hai river region [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001, 59(6): 784-793. (in Chinese)
- [8] Allen R G, Jensen M E, Wright J L, et al. Operational estimates of reference evapotranspiration [J]. Agron J, 1989, 81: 650-622.
- [9] 李玉霖, 崔建垣, 张铜会. 参考作物蒸散量计算方法的比较研究 [J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 372-376.
Li Y L, Cui J Y, Zhang T H. Comparative study on calculation

- methods of reference evapotranspiration [J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(4): 372-376. (in Chinese)
- [10] 杜尧东, 刘作新, 张运福. 参考作物蒸散计算方法及其评价 [J]. *河南农业大学学报*, 2001, 35(1): 57-61.
Du Y D, Liu Z X, Zhang Y F. Evaluation of two reference crop evapotranspiration calculation methods [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2001, 35(1): 57-61. (in Chinese)
- [11] 彭世彰, 徐俊增. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法的应用比较 [J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(6): 5-9.
Peng S Z, Xu J Z. Comparison of reference crop evapotranspiration computing methods [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(6): 5-9. (in Chinese)
- [12] 毛飞, 张光智, 徐祥德. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较 [J]. *应用气象学报*, 2000, 11(增刊): 128-136.
Mao F, Zhang G Z, Xu X D. Several methods of calculating the reference evapotranspiration and comparison of their results [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2000, 11(Suppl): 128-136. (in Chinese)
- [13] 武夏宁, 胡铁松, 王修贵, 等. 区域蒸散发估算测定方法综述 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(10): 257-262.
Wu X N, Hu T S, Wang X G, et al. Review of estimating and measuring regional evapotranspiration [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(10): 257-262. (in Chinese)
- [14] Monin A S, Oblukhov A M. Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground [J]. *Trudy Geofizicheskogo Instituta Akademiyi Nauk SSSR*, 1954, 24, 151: 163-187.
- [15] Businger J A, Wyngaard J C, Lzumi Y, et al. Flux profile relations in the atmospheric surface layer [J]. *Journal of Atmospheric Science*, 1971, 28: 181-189.
- [16] Kustas W P, Choudhury B J, Moran M S, et al. Determination of sensible heat flux over sparse canopy using thermal infrared data [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, 44(3/4): 197-216.
- [17] Troufleau D, Lhomme J P, Monterey B, et al. Sensible heat flux and radiometric surface temperature over sparse sahelian vegetation I: An experimental analysis of the kB^{-1} parameter [J]. *Journal of Hydrology*, 1996(188/189): 815-838.
- [18] Sun Jielun, Mahrt L. Determination of surface fluxes from the surface radiative temperature [J]. *Journal of the Atmospheric Science*, 1995, 52(8): 1096-1106.
- [19] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops - An energy combination theory [J]. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 1985, 111: 839-855.
- [20] 黄妙芬. 地表通量研究进展 [J]. *干旱区地理*, 2003, 26(2): 159-165.
Huang M F. Advance of research on surface flux [J]. *Arid Land Geography*, 2003, 26(2): 159-165. (in Chinese)
- [21] Shuttleworth W J, Gurney R J. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops [J]. *Q J R Meteorol Soc*, 1990, 116: 497-519.
- [22] Kustas W P. Estimation of evapotranspiration with a one-layer and two-layer model of h at transfer over partial canopy cover [J]. *J Appl Meteorol*, 1990, 29: 704-715.
- [23] Lhomme J P. Comment on dual-source vegetation-atmosphere transfer models [J]. *J Hydrol*, 1999, 94: 269-273.
- [24] 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]. *Agric For Meteorol*, 1995, 77: 263-293.
- [25] Blyth E M, Harding R J. Application of aggregation model to surface heat flux from the Sahelian tiger bush [J]. *Agric For Meteorol*, 1995, 72: 213-235.
- [26] Choudhury B J, Monteith J L. A four-layer model for the heat budget of homogenous land surfaces [J]. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 1988, 114: 373-398.
- [27] 辛晓洲, 田国良, 柳钦火. 地表蒸散定量遥感的研究进展 [J]. *遥感学报*, 2003, 5(3): 233-240.
Xin X Z, Tian G L, Liu Q H. A review of researches on remote sensing of land surface evapotranspiration [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 5(3): 233-240. (in Chinese)
- [28] 王开存, 周秀骥, 李维亮, 等. 利用卫星遥感资料反演感热和潜热通量的研究综述 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 42-48.
Wang K C, Zhou X J, Li W L, et al. Using satellite remotely sensed data to retrieve sensible and latent heat fluxes: A review [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(1): 42-48. (in Chinese)
- [29] Bouchet R J. Evapotranspiration reelet potentielle, Signification climatique [C]//Assoc Sci Hydro. Belgium: General Assembly Berkeley Int, 1963, 62: 134-142.
- [30] Morton F L. Operational estimates of area evapotranspiration and their significance to the science and practice of Hydrology [J]. *J Hydrology*, 1983, 66: 1-76.
- [31] Brutsaert W, Stricker H. An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration [J]. *Water Resour Res*, 1979, 15(2): 443-450.
- [32] Granger R J. An examination of the concept of potential evaporation [J]. *J Hydrol*, 1989, 111: 9-19.
- [33] Granger R J, Gray D M. Evaporation from natural non-saturated surfaces [J]. *J Hydrol*, 1989, 111: 21-29.
- [34] 刘绍民, 孙睿, 孙中平, 等. 基于互补相关原理的区域蒸散量估算模型比较 [J]. *地理学报*, 2004, 5(3): 331-340.
Liu S M, Sun R, Sun Z P, et al. Comparison of different complementary relationship models for regional evapotranspiration estimation [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 5(3): 331-340. (in Chinese)
- [35] 胡凤彬, 康瑛. 加拿大 CRAE 蒸散发模型开发应用 [J]. *淮海大学学报*, 1994(3): 58-65.
Hu F B, Kang Y. Application of the CRAE Model of Canada [J]. *Journal of Hehai University*, 1994(3): 58-65. (in Chinese)
- [36] Jackson R D, Reginato R J, Idso S B. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements [J]. *Water Resources Research*, 1977, 13(3): 651-656.
- [37] Bella C M D I, Rebella C M, Paruelo J M. Evapotranspiration

- estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(4): 791-797.
- [38] Rabin Robert M. Relating remotely sensed vegetation and soil indices to surface energy fluxes in vicinity of an atmosphere dryline [J]. *Remote Sensing Reviews*, 2000, 18: 53-58.
- [39] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): I. Formulation [J]. *Journal of Hydrology*, 1998(212/213): 198-212.
- [40] Bastiaanssen W G M, Pelgrum H, Wang J, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): II. Validation [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 212-213: 213-229.
- [41] Su Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes [J]. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2002, 6(1): 85-99.
- [42] 何延波, Su Z B, Li J, et al. SEBS 模型在黄淮海地区地表能量通量估算中的应用 [J]. *高原气象*, 2006, 25(6): 1092-1100.
He Y B, Su Z B, Li J, et al. Estimation of surface energy flux using surface energy balance system (SEBS) in the Yellow-Huaihe-Haihe river regions [J]. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(6): 1092-1100. (in Chinese)
- [43] Zhang R H, Sun X M, Zhu Z L, et al. A remote sensing model for monitoring soil evaporation based on thermal inertia and its validation [J]. *Science in China (D)*, 2003, 46(4): 342-355.
- [44] Willem W Verstraeten, Frank Veroustraete, Jan Feyen. Estimating evapotranspiration of European forests from NOAA imagery at satellite overpass time: Towards an operational processing chain for integrated optical and thermal sensor data products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96: 256-276.
- [45] 陈镜明. 现用遥感蒸散模式中的一个重要缺点及改进 [J]. *科学通报*, 1988, 33(6): 454-457.
Chen J M. An important shortcoming and improvement in the model of remote sensing evaporation [J]. *Chin Sci Bull*, 1988, 33(6): 454-457. (in Chinese)
- [46] 谢贤群. 遥感瞬时作物表面温度估算农田全日蒸散总量 [J]. *环境遥感*, 1991, 6(4): 254-260.
Xie X Q. Estimation of daily evapotranspiration (ET) from one time-of-day remotely sensed canopy temperature [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 6(4): 254-260. (in Chinese)
- [47] 陈添宇, 陈 乾, 李宝梓. 用卫星资料反演中国西北地区东部蒸散量的遥感模型 [J]. *水科学进展*, 2006, 17(6): 834-840.
Chen T Y, Chen Q, Li B Z. Remote sensing model for evapotranspiration over the eastern part of northwest China using satellite data retrieval [J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(6): 834-840. (in Chinese)
- [48] 倪 猛, 陈 波, 岳建华, 等. 洛河流域蒸散发遥感反演及其与各参数的相关性分析 [J]. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(6): 34-37.
- Ni M, Chen B, Yue J H, et al. Estimating evaporation in Luo river basin using remote sensing and analyzing correlation between evaporation and various parameter [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(6): 34-37. (in Chinese)
- [49] 乔平林, 张继贤, 王翠华, 等. 区域蒸散发量的遥感模型方法研究 [J]. *测绘科学*, 2006, 31(3): 45-61.
Qiao P L, Zhang J X, Wang C H. Study on regional evapotranspiration model based on remote sensing method [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(3): 45-61. (in Chinese)
- [50] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 区域遥感蒸散发估算 [J]. *气象学报*, 2002, 60(4): 508-512.
Chen Y H, Li X B, Shi P J. The remote sensing model for regional evapotranspiration estimation over heterogeneous landscape [J]. 2002, 60(4): 508-512. (in Chinese)
- [51] 詹志明, 冯兆东, 秦其明. 陇西黄土高原陆面蒸散的遥感研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(1): 16-19.
Zhan Z M, Feng Z D, Qin Q M. Study on the surface evapotranspiration based on remote sensing data on Longxi Loess Plateau of China [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(1): 16-19. (in Chinese)
- [52] 辛晓洲. 用定量方法计算地表蒸散 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用所, 2003.
Xin X Z. Estimating evapotranspiration using quantitative parameters derived from remote sensing [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [53] 隋洪智, 田国良, 李付琴. 农田蒸散双层模型及其在干旱遥感监测中的应用 [J]. *遥感学报*, 1997, 1(3): 220-224.
Sui H Z, Tian G L, Li F Q. Two-layer model for monitoring drought using remote sensing [J]. *Remote Sensing*, 1997, 1(3): 220-224. (in Chinese)
- [54] 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.
Liu Y N, Wu J J, Xia H, 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. (in Chinese)
- [55] 张万昌, 刘三超, 蒋建军, 等. 基于 GIS 技术的黑河流域地表通量及蒸散发遥感反演 [J]. *海洋科学进展*, 2004, 22(增刊): 138-145.
Zhang W C, Liu S C, Jiang J J, et al. GIS-based retrieval of surface flux and evapotranspiration over Heihe river basin from remote sensing data [J]. *Advances in Marine Science*, 2004, 22(Suppl): 138-145. (in Chinese)
- [56] 王介民, 刘绍民, 孙敏章, 等. ET 的遥感监测与流域尺度水资源管理 [J]. *干旱气象*, 2005, 23(2): 1-7.
Wang J M, Liu S M, Sun M Z, et al. Monitoring ET with remote sensing and the management of water resources on a basin scale [J]. *Arid Meteorology*, 2005, 23(2): 1-7. (in Chinese)
- [57] 潘卫华, 徐涵秋, 李 文, 等. 卫星遥感在东南沿海区域蒸散

- (发)量计算上的反演 [J]. 中国农业气象, 2007, 28(2): 154-158.
- Pan W H, Xu H Q, Li W, et al. Regional evapotranspiration estimation in Quanzhou city by using remote sensing technology [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(2): 154-158. (in Chinese)
- [58] 张长春, 王光谦, 魏加华, 等. 联合 TM 和 NOAA 数据研究黄河三角洲地表蒸发(散)量 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(9): 1184-1188.
- Zhang C C, Wang G Q, Wei J H, et al. Estimates of evapotranspiration based on TM and NOAA data in the Yellow River delta [J]. J Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2005, 45(9): 1184-1188. (in Chinese)
- [59] 崔亚莉, 徐映雪, 邵景力, 等. 应用遥感方法研究黄河三角洲地表蒸发及其与下垫面的关系 [J]. 地学前缘, 2005, 12(特刊): 159-165.
- Cui Y L, Xu Y X, Shao J L, et al. A study of evaporation and its relationship with the surface parameters using remote sensing data in the Yellow River delta (YRD) [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(Suppl): 159-165. (in Chinese)
- [60] 潘志强, 刘高焕. 黄河三角洲蒸散的遥感研究 [J]. 地球信息科学, 2003, 8(3): 91-96.
- Pan Z Q, Liu G H. Evapotranspiration research of Yellow River delta using remote sensing method [J]. Geo-Information Science, 2003, 8(3): 91-96. (in Chinese)
- [61] 杨何群. 基于遥感和 DEM 的山区-平原地表水热通量估算及对比分析研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- Yang H Q. Estimation and analysis of land surface water and heat fluxes in mountain-plain area based on remote sensing and DEM [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006. (in Chinese)
- [62] 何延波, Su Z B, Jia L, 等. 遥感数据支持下不同地表覆盖的区域蒸散 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 288-296.
- He Y B, Su Z B, Jia L, et al. Regional evapotranspiration of different land covers based on remote sensing [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(2): 288-296. (in Chinese)
- [63] 毛晓敏, 尚松浩, 雷志栋, 等. 利用 SPAC 模型对冬小麦蒸散发的研究 [J]. 水利学报, 2001, 46(8): 7-11.
- Mao X M, Shang S H, Lei Z D, et al. Study on evapotranspiration of winter wheat using SPAC model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 46(8): 7-11. (in Chinese)
- [64] 刘树华, 于飞, 刘和平, 等. 干旱、半干旱地区蒸散过程的模式研究 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(3): 359-366.
- Liu S H, Yu F, Liu H P, et al. Study of evapotranspiration mechanism and coupling modeling in arid and semi-arid regions [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis: Nat Sci Ed, 2007, 43(3): 359-366. (in Chinese)
- [65] 陈丹, 莫兴国, 林忠辉. 基于 MODIS 数据的无定河流域蒸散模拟 [J]. 地理研究, 2006, 25(4): 617-623.
- Chen D, Mo X G, Lin Z H, et al. Estimation of evapotranspiration over Wuding river basin with an eco-hydrological model and MODIS data [J]. Geographical Research, 2006, 25(4): 617-623. (in Chinese)
- [66] Hoedjes J C B, Zuurbier R M, Wattes C J. Larger aperture scintillometer used over a homogeneous irrigate Area, pratty affected by regional advection [J]. Boundary-layer Meteorology, 2002, 105: 99-117.
- [67] Beyrich F, Rdebrum H A. Results from one-year continuous operation of a large aperture scintillometer over a heterogeneous land surface [J]. Boundary-layer Meteorology, 2002, 105: 85-97.

(上接第 160 页)

- [10] Simpson J J, McIntire T J. A recurrent neural network classifier for improved retrievals of area extent of snow cover [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(10): 2135-2147.
- [11] 章孝灿, 黄智才, 赵元洪, 等. 遥感数字图像处理 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003.
- Zhang X C, Huang Z C, Zhao Y H, et al. Remote sensing digital image [M]. Hangzhou: Zhejiang University Publishing House, 2003. (in Chinese)
- [12] 王永骥, 涂健. 神经网络控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- Wang Y J, Tu J. Artificial neural network control [M]. Beijing: China Machine Press, 1998. (in Chinese)
- [13] 王洪元, 史国栋. 人工神经网络技术及其应用 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2002.
- Wang H Y, Shi G D. Artificial neural network and its application [M]. Beijing: China Petrochemical Publishing House, 2002. (in Chinese)
- [14] 王野乔. 遥感及多源地理数据分类中的人工神经网络模型 [J]. 地理科学, 1997, 17(2): 105-111.
- Wang Y Q. Artificial neural network models in remote sensing and multisource geographic data classification [J]. Scientia Geographica Sinica, 1997, 17(2): 105-111. (in Chinese)
- [15] 万昊, 任勇, 山秀明. 基于混淆矩阵的全方位雷达目标识别 [J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(3): 136-143.
- Wan H, Ren Y, Shan X M, et al. Confusion-Matrix based whole-aspect-range HRRP recognition [J]. Microelectronics & Computer, 2005, 22(3): 136-143. (in Chinese)