

文章编号:1001-8166(2011)08-0848-11

# 遥感技术估算干旱区蒸散发研究进展\*

王国华<sup>1,2</sup>, 赵文智<sup>2</sup>

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 遥感技术能够提供大范围地表特征参数的特点使其在干旱区蒸散发研究中得到广泛的应用。介绍了遥感技术求取干旱区地表特征参数(地表反照率、冠层叶面积指数、地表温度)的方法, 并对遥感估算干旱区的主要计算模型做了概括和分析, 最后提出了估算过程中主要存在的问题和未来发展的方向。

**关键词:** 遥感技术; 地表特征参数; 干旱区蒸散发; 计算模型

**中图分类号:** P426.2; TP79 **文献标志码:** A

## 1 引言

蒸散发是地面蒸发和植被蒸腾的合称, 包括地面上植物的叶面蒸腾与植株间土壤蒸发。在占陆地面积 1/3 的干旱区, 地域辽阔, 水分稀少, 90% 的有效降水耗散于蒸散发过程中<sup>[1,2]</sup>, 使干旱区生态环境极为脆弱, 水资源缺乏也随之成为干旱区经济发展和生态保护的主要限制因子。精确估算干旱区蒸散发量对该地区农业生产发展以及生态环境保护有重要的作用。

自 1802 年道尔顿定理建立以来, 在对蒸散发研究过程中出现了多种蒸散发的估算方法。1926 年, Bowen<sup>[3]</sup> 从能量平衡方程出发, 提出了计算蒸发的波文比—能量平衡法。1939 年, Thornthwaite 等<sup>[4]</sup> 利用边界层相似理论提出计算蒸发的空气动力学方法。1948 年, Penman<sup>[5]</sup> 提出了“蒸发力”的概念, 并将能量平衡和大气湍流相似性理论结合在一起建立了联合蒸散方程。1965 年, Monteith<sup>[6]</sup> 在引入了“表面阻抗”的概念后, 导出著名的 Penman-Monteith (P-M) 公式, 为非饱和下垫面的蒸发研究开辟了新的途径。在 P-M 公式的使用上, Allen 等<sup>[7]</sup> 利用赋予参考作物冠层阻力和固定高度的方法对在各种不同环

境条件下使用 P-M 公式做出了详尽的说明。1972 年, Priestley 等<sup>[8]</sup> 研究了在最小平流的前提下潜在的蒸散发耗水量。此后, 以能量平衡原理为基础, 学者们又开展了大量的蒸散发分层模型研究。其中单层模型主要是采用能量平衡余项法, 在估算过程中对土壤蒸发和植被蒸腾不作区别, 将能量界面当作一个整体来估算蒸散发的方法, 但这种方法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<sup>[9]</sup>。针对单层模型的不足, Shuttleworth 等<sup>[10]</sup> 将土壤蒸发和植被蒸腾看作不同的通量源, 在 P-M 公式理论的基础上提出了双层模型, 将土壤蒸发和植被蒸腾加以区别分别来进行计算。在双层模型的基础上, Dolman<sup>[11]</sup> 提出了三层模型, Choudhury 等<sup>[12]</sup> 提出了四层模型。1995 年, Blyth 等<sup>[13]</sup> 提出把土壤和植被看作是并列的, 假设两者没有相互作用, 植被只是缀在裸露的土壤上。Norman 等<sup>[14]</sup> 应用 Blyth 和 Harding 提出的观点建立了针对行播种物的双源模型。以上有关蒸散发传统的计算方法主要是在点数据的基础上进行计算, 在单个站点的计算中, 精度较高。但在实际估算中, 往往需要了解区域面积的地表蒸散发, 由于干旱区下垫面几何结构和物理性质的水平不均匀性, 由点到面转化存在极大的

\* 收稿日期: 2011-04-25; 修回日期: 2011-06-27.

\* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目“人工绿洲蒸散过程多尺度观测与模拟”(编号: 40930634) 资助。

作者简介: 王国华(1984-), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 主要从事干旱区水文水资源研究. E-mail: gimil23@126.com

不确定性,因此很难取得准确的估算结果<sup>[15,16]</sup>。虽然这种状况可以通过多点观测来加以改善,但多点密集观测成本高,并且对于大尺度蒸散发研究依然存在尺度转换问题。而遥感方法空间连续和时间动态变化的特点,能够轻易实现由点到面的转换,同时可以提供与地表蒸散和能量平衡过程密切相关的参数,这些特点使其在干旱区大尺度蒸散发估算研究中得到了广泛应用。

## 2 遥感反演干旱区地表特征参数

遥感方法是一种间接的蒸散发估算方法,并不能直接估算得到蒸散发,而是将其反演的干旱区地表参数输入模型中,计算得到实际的蒸散发。应用遥感技术估算蒸散发的关键技术是如何使用遥感数据准确获取地表反照率、植被参数和地表温度。这3个参数可以综合反映干旱区下垫面的几何结构和湿热状况,并影响着地表能量收支、动量和热量传输等,它们反演的正确与否直接影响到干旱区地表蒸散发估算精度,因此,学者们针对这3个地表参数开展了大量研究。

### 2.1 地表反照率

地表反照率表示到达地表的太阳辐射中不能被地表吸收的部分,决定了地表蒸散发有效能量的大小。反演地表反照率最主要的影响因素有太阳高度角和地表覆盖类型<sup>[17]</sup>。

太阳高度角对地表反照率的作用是间接的,主要是通过改变地表粗糙度的大小来影响太阳辐射形成的阴影面积,从而影响地表反照率的大小。刘辉志等<sup>[18]</sup>通过研究干旱区不同下垫面地表反照率特点指出:太阳高度角低于 $40^\circ$ 的情况下,地表反照率会随着太阳高度角的增加而降低,但当太阳高度大于 $40^\circ$ 时,地表反照率基本上趋于不变。张果等<sup>[19]</sup>在对内蒙古荒漠草原地表反照率研究中得到了和刘辉志相同的结论,并指出地表反照率与太阳高度角呈指数关系。文莉娟等<sup>[20]</sup>对干旱区绿洲地表反照率进行了研究,结果表明:在太阳高度角为 $30^\circ$ 时早上比下午的地表反照率大0.031,在太阳高度角为 $40^\circ \sim 50^\circ$ 时,上午和下午的地表反照率基本一致。吴艾筌等<sup>[21]</sup>对黑河实验区不同下垫面的地表反照率和太阳高度角进行了研究,并建立了地表反照率和太阳高度角的函数关系。

同时,也有学者提出地表反照率也会随着下垫面的不同存在明显的差异<sup>[22]</sup>。陈浩等<sup>[23]</sup>按照不同下垫面土地利用类型分别建立了相应的地表反照

率计算方法,并对我国西北地区地表反照率进行了计算,计算精度较高。肖瑶等<sup>[24]</sup>对西藏北部3种不同植被类型下垫面的地表反照率特征进行了分析,结果表明:与其他植被类型相比,荒漠草原反照率最大。郭建茂等<sup>[25]</sup>在宁夏地区对地表特征参数的研究中,得到地表反照率的低值区多为水体和浓密植被,最高值区为裸地。张杰等<sup>[26]</sup>应用EOS-MODIS卫星资料反演了西北干旱绿洲的地表反照率,得出结论土壤、植被、沙漠、水体的地表反照率存在显著不同。

虽然学者们在我国西北干旱区开展了大量的地表反照率研究,且应用遥感技术反演地表反照率也有了较为成熟的方法,但相对而言,我国西北干旱区地表反照率的确定工作还没有取得实质性的进展<sup>[27]</sup>,还需要再做进一步的研究。

### 2.2 植被参数

植被参数决定了地表蒸散发有效能量在植被和土壤间的分配,是影响蒸散发进行能量和水分交换的重要参数。主要的参数包括植被覆盖度、叶面积指数和归一化植被指数等。

#### 2.2.1 植被覆盖度

植被覆盖度是指植被投影面积在单位面积上所占的比例。传统的估算方法主要是依靠地面样方获取到点上的植被覆盖度。然而植被覆盖度具有明显的时空变异性,地表实测的点数据很难在较大的空间尺度上进行动态测量。遥感影像能够提供反映大尺度空间尺度的植被覆盖信息及变化趋势,这一特点使其成为估算区域植被覆盖度的主要技术手段。

当前遥感技术估算植被覆盖度的方法主要有3种:经验模型法、植被指数转换法和混合像元分解法。

(1) 经验模型法:经验模型主要是通过建立实测植被覆盖度数据与植被指数的经验模型来求取植被覆盖度。经典的模型有:Eastwood等<sup>[28]</sup>建立了多种植被指数和植被覆盖度的线性回归方程;Dymond等<sup>[29]</sup>在新西兰地区用多波段SPOT资料建立了地表植被覆盖度与NDVI的非线性经验关系模型;Wittich等<sup>[30]</sup>用NOAA/AVHRR数据按照不同覆盖类型建立了植被覆盖度和NDVI的经验关系。但由于该模型依赖于特定的地面数据,在区域范围内推广应用存在诸多的不确定因素。尤其是在干旱区和半干旱区这种生态环境变化比较大的区域。

(2) 植被指数转换法:植被指数转换法是通过对各像元中植被类型及分布特征的分析,建立植被指数与植被覆盖度的转换关系来直接提取植被覆盖

度的信息。Quarmby 等<sup>[31]</sup>利用 AVHRR 资料,建立植被指数与植被覆盖度的线性转换模型。Gutman 等<sup>[32]</sup>从像元中可能的植被分布特征入手,提出了均一亚像元模型和混合像元模型。Mohammad 等<sup>[33]</sup>在叙利亚地区计算了 SPOT 影像的原 NDVI 值,并重新定义了一个新的 NDVI 值,最后用 NDVI 值的大小来对植被覆盖度进行分类。相比于经验模型,植被指数法不需要进行大面积的地面实测,但这种方法的精度却可能低于经验模型。

(3) 混合像元分解法:混合像元分解法是根据植被和土壤在不同波谱段的反射情况,一般选择植被与土壤光谱反射差别较大的红光波段和近红外波段作为植被覆盖度信息提取的信息源。但准确估算植被覆盖度的前提是必须先知道裸土、植被在遥感图像近红外、可见光红波段的反射率差值。对于土壤和植被均匀单一的地区,可以通过实测或在图像上量取,但对于土壤类型和植被种类差异较大的地区,这种方法提取结果精度较差,因此该方法应用于干旱区植被参数反演有一定的局限性。

### 2.2.2 叶面积指数

叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)表示单位土地面积上单面植物光合作用面积的总和。传统的地面实测方法只能提供小尺度的 LAI,卫星遥感技术为大区域研究 LAI 提供了有效的途径<sup>[34]</sup>。遥感定量计算 LAI 的主要方法可以归纳为:光学模型法、查找表法、统计模型法和综合模型法。

(1) 光学模型法:光学模型法是应用双向发射率分布函数,把 LAI 作为输入变量,采用迭代方法来推算 LAI。这种方法的优点是有物理模型基础,不受植被类型的影响,但模型复杂,反演过程比较繁琐,针对这种方法的研究较少。其中主要的代表模型是 Li Strahler 模型,该模型从像元尺度出发,建立森林结构参数与冠层双向反射分布函数的关系<sup>[35]</sup>。Chen 等<sup>[36]</sup>在 Li Strahler 模型基础上提出针对北方针叶林的四尺度、五尺度的几何光学模型。光学模型具有相当强的理论基础,不依赖于植被的具体类型或背景环境的变化,因而具有普适性,但由于反演过程复杂,模型直接反演需要消耗大量的计算资源和时间,因此没有得到广泛应用。

(2) 查找表法:与光学模型法比较,查找表法模型可以实现参数的快速反演。查找表法将复杂的光学物理模型进行事先模拟,反演高效并且不需要给定初始值,极大提高了模拟速度,被普遍用于各种遥感反演算法中。MODIS(NASA)的全球 LAI 标准产

品,主要就是通过采用查找表法来反演得到的<sup>[37,38]</sup>。但为了满足精度要求,查找表的维度需要做到足够大,并且状态变量采样间隔必须要小,当输入参数较为复杂时,查找表的管理和使用都十分困难<sup>[39]</sup>。

(3) 统计模型法:统计分析法是以 LAI 为因变量,以光谱数据或其变换形式,如植被指数,作为自变量建立的估算模型,即  $LAI=f(x)$ ,其中,  $x$  为光谱反射率或植被指数。在多光谱和高光谱领域都可以应用植被指数来估算 LAI。多光谱估算叶面积指数最为常用的植被指数是归一化植被指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)、比值植被指数(Ratio Vegetation Index, RVI)、垂直植被指数(Perpendicular Vegetation Index, PVI)。NDVI 对绿色植被表现敏感,探测低盖度绿色植被能力最强<sup>[40]</sup>。何磊等<sup>[41]</sup>通过对岷江上游流域叶面积指数的遥感研究也证实 NDVI 在反演叶面积指数中具有很高的精度。相较于 NDVI, RVI 对大气的敏感,尤其当植被覆盖不够浓密时,它的分辨能力就会很弱,Chen 等<sup>[42]</sup>发现在高密度植被覆盖的情况下, RVI 却很适合 LAI 的反演。而 PVI 的优点就是在反演过程中受土壤亮度的影响较小。张晓阳等<sup>[43]</sup>从作物冠层对光谱的反射特征出发,推导出利用 PVI 估算 LAI 的理论模型,并应用水稻观测加以验证,结果表明:PVI 估算 LAI 既有较强的理论基础,又可以消除土壤背景的影响。在这 3 种植被指数中, NDVI 数值大小能够消除大部分与仪器定标、太阳角、地形、和大气等条件的影响,可以增强对植被的响应能力,已得到了广泛应用。

(4) 综合模型法:除了以上 3 种方法外,有学者将光学模型法和统计模型法结合起来以发挥它们各自的优势,研究得到了综合模型法。主要的模型有: Qi 等<sup>[44]</sup>在 Arizona 东南半干旱区,结合 BRDF 模型反演和植被指数统计分析,较好地估算了大尺度的 LAI。Fang 等<sup>[45]</sup>综合神经网络法从 TM 图像上反演叶面积指数。

### 2.2.3 归一化植被指数

归一化指数(NDVI)被定义为近红外波段与可见光红波段数值之差和这 2 个波段数值之和的比值。在植被参数反演中, NDVI 的应用最为广泛。它是植被生长状态及植被覆盖度的最佳指示因子,它可以部分消除太阳高度角、卫星扫描角及大气层辐射的影响,特别适用于全球或各大陆等大尺度的植被参数研究。并且,在植被覆盖度小于 15% 时,

植被的 NDVI 值高于裸土的 NDVI 值,植被可以被检测出来,这样的特点使其在干旱区和半干旱区参数反演过程中达到了广泛的使用。

### 2.3 地表温度

地表温度是地面和大气界面热量平衡的结果,在地表蒸散发过程中决定地表长波辐射能量的大小。应用遥感技术获取地表温度的方法主要有单窗算法、劈窗算法和多通道法。

#### 2.3.1 单窗算法

单窗算法主要是针对 Landsat TM 热波段传感器开发,利用一个热红外通道的辐射测量来实现地表温度的反演<sup>[46]</sup>。长期以来,从 TM 数据中反演地表温度的方法主要是大气校正法。但这种计算方法需要提供精确的实时大气剖面数据进行大气模拟,而对于大多数研究区,这些数据难以取得,因此限制了该算法的广泛使用<sup>[47]</sup>。为了解决这一问题,覃志豪等<sup>[48]</sup>根据地表热辐射传导方程,推导出一个简单易行而且精度较高的演算方法,把大气和地表的影响直接包括在演算过程中。Jménez-Munöz 等<sup>[49]</sup>提出了另一种单窗算法,这种算法只需要知道大气水汽含量即可反演地表温度。为了检验以上 3 种单窗计算方法的精确性,Sobrinó 等<sup>[50]</sup>用实测资料对其进行了验证,结果表明:Jménez-Munöz 提出的算法较好,地表温度误差小于 1 K。

#### 2.3.2 劈窗算法

劈窗算法主要是针对 NOAA/AVHRR 开发的,是利用 2 个相邻的热红外光谱窗口辐射值,根据地面发射率和地表温度的线性关系,得到由 2 个窗口区辐射温度的线性组合表示的地表温度。该模式由 Anding 等<sup>[51]</sup>提出,由 Prabhakara 等<sup>[52]</sup>发展成为现在的经典形式。最初,劈窗算法较好地应用在计算海面温度上,但直接将它应用在陆面,误差可达到 6 K。Price<sup>[53]</sup>为了估算农田地表温度,首次把海面遥感劈窗算法引用到陆地温度反演。Coll 等<sup>[54]</sup>对 Price 提出的算法进行了改进,他们引进了地表比辐射率对地表温度的修改。而 Becker<sup>[55]</sup>在考虑了 AVHRR 第 4 和第 5 通道的地表反射率之差对温度反演的影响之后,提出一个模型解释了热红外测量温度和热力学温度的差别。伊楠等<sup>[56]</sup>在我国吉林西部利用 AVHRR 数据反演地表温度,发现 Price 算法和其他算法的偏差较大,而 Coll 所提出的算法结果和统计数据相当接近。2005 年,毛克彪等<sup>[57]</sup>对普朗克方程进行了线性变换,从而简化了劈窗算法的计算过程。由于估算精度较高,劈窗算法得到了

广泛的应用,目前已公开的劈窗算法就有 17 种<sup>[58]</sup>。

#### 2.3.3 多通道法

多通道法目前广泛应用在 MODIS 和 ASTER 温度产品算法当中。针对 MODIS, Wan 等<sup>[59]</sup>提出利用多光谱数据进行地表温度和发射率的同步反演,前提是需要昼夜两景图像才能进行反演。而针对 ASTER, Gillespie 等<sup>[60]</sup>提出 TES (Temperature Emissivity Separation) 算法,这种计算方法吸收了 NEM (Normalized Emissivity Method), RAT (Ratio Algorithm) 和 MMD (Mean-MMD Method) 3 种算法的优点。毛克彪等<sup>[61]</sup>针对这 2 种来源不同的遥感数据,通过研究指出:MODIS 适合于大中尺度的空间热量分析,而 ASTER 适合城市和区域小尺度的空间热量分析。Jacob<sup>[62]</sup>用上述 2 种方法计算了美国北部半干旱区 Chihuahuan 沙漠和非洲中部大草原的地表温度,结果表明 2 种方法获取的地表温度具有很好的一致性,温差仅有 0.9 °C。赵小艳等<sup>[63]</sup>利用 ASTER 数据反演南京城市地表温度,并用同步的 MODIS 数据进行了验证,也得到了和 Jacob 相似的结果,即基于 ASTER 数据所得地表温度与 MODIS 数据反演结果有较好的空间一致性。

以上这 3 个遥感参数是估算干旱区蒸散发最重要的参数,其中地表反照率决定了地表蒸散发有效能量的大小,植被参数决定了地表蒸散发有效能量在植被和土壤间的分配,地表温度决定地表蒸散发中长波辐射能量的大小,它们影响着蒸散发的整个过程,而遥感的精确估算为干旱区蒸散发估算结果的准确提供了重要的保证。

## 3 遥感估算干旱区蒸散发的研究进展

干旱区年降水量小于 200 mm,很多地区甚至小于 50 mm,但区域内 90% 的水分耗散在蒸散发过程中<sup>[2]</sup>,为了减少蒸散发水分损失,提高水分利用率,学者们应用遥感技术在干旱区针对干旱区区域和农田的蒸散发开展了广泛的研究。主要的方法归纳为以下几种:

### 3.1 基于能量平衡的遥感蒸散发模型

干旱区水分分布极不均匀,水资源缺乏的地方成为荒漠,水资源丰富的地方则成为了绿洲。绿洲的“冷岛效应”明显,气候较为湿润,水源较充足,而荒漠气候干燥,降水极少,含有较高的热能,两者温度和湿度的差异形成了鲜明的对比<sup>[64]</sup>。基于能量平衡原理开发的 SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) 和 SEBS (Surface Energy Balance

System)模型在估算干旱区蒸散发中突出了干旱区不同地区水分和温度差异极大的这一特点,在模型中假设了冷热不同的 2 种极端的情况,较好地反映了干旱区绿洲和荒漠之间的差异,近年来,在估算干旱区区域蒸散发和农田蒸散发研究中得到了广泛应用和研究。

SEBAL 模型是 Bastiaanse 等<sup>[65,66]</sup>提出的单层遥感蒸散发模型,模型首先利用地表反照率和辐射表面平衡方程计算得到净辐射通量,然后利用地表辐射温度等遥感参数求出感热通量和土壤热通量,最后将潜热通量作为能量平衡的余项求出。但由于估算结果是图像获取时刻的瞬时蒸散发,需要通过假设蒸散比在一天之内为常数,扩展时间尺度来计算得到全天以及更长时间的总蒸散。SEBAL 模型计算大面积的干旱区区域蒸散发,创新之处在于计算感热通量时,假设在 2 个参考高度间的温度差与地表温度成线性关系  $T_1 - T_2 = aT + b$  ( $T_1, T_2$  为 2 个参考高度温度,  $T$  为地表温度,  $a, b$  为经验值),然后在遥感图像中确定 2 个“极端点”来完成地表温度的反演。这 2 个“极端点”,其中一个“冷点”,“冷点”代表植被密集,水分供应充足,散发处于潜在蒸散发的水平;另一个是“热点”,“热点”是指极端干燥而几乎没有植被覆盖的地方,其蒸散发量几乎为零。这样的假设符合干旱区的水分分布不均的区域特征,模型估算蒸散发的结果非常精确。刘志武等<sup>[67]</sup>应用 SEBAL 模型对新疆南部蒸散发进行了研究,结果表明荒漠地区地表干燥,降水极少,蒸散发几乎为零,绿洲农田蒸散发大于自然植被,并指出 SEBAL 可以用来估算干旱区区域蒸散发。郭玉川等<sup>[68]</sup>通过对新疆干旱盆地进行研究,结果同样表明戈壁水分稀少,蒸散发量几乎为零,而在水分较为充足的农田地区,蒸散发比较强烈,结论指出:利用 SEBAL 模型反演西北内陆干旱区区域蒸散发较为理想。SEBAL 模型中“冷热”极限点的应用准确地反映了干旱区不同地区水分和冷热差异明显的特征,所以估算得到的蒸散量精度也较高。但该模型在估算蒸散发过程中依然存在不足。首先,SEBAL 模型所采用的各项参数和地面实测数据之间存在一定的误差,主要的原因在于模型的各项参数是瞬时遥感数据,而实测数据是持续过程数据。其次,模型在用瞬时蒸散结果来推算持续的蒸散发过程,采用了蒸散比不变法,即假设一天之内能量通量的分配是相同的,这种假设条件一般很难达到,所以这种假设也使 SEBAL 模型在估算干旱区蒸散发时也会产

生误差。

Su<sup>[69]</sup>提出的 SEBS 模型是另一种基于能量平衡原理开发的蒸散发模型,与 SEBAL 模型通过能量平衡余项法来得到潜在蒸散发不同,SEBS 是通过地表能量平衡指数的方法来获得地表潜热通量。模型中同样假设了“2 种极端”的情况:一种是土壤水分亏缺的干燥地表,植被稀少,几乎没有水分供给蒸散发,潜热通量约为零,感热通量最大,用公式可以表示为:  $H_{dry} = R_n - G_o$  ( $H_{dry}$  为干燥地表的感热通量,  $R_n$  为净辐射,  $G_o$  为土壤热通量);另一种极端情况是土壤水分充足的湿润地表,植被较为丰富,感热通量达到最小值,而潜热通量达到了最大,用公式可以表示为:  $\lambda E_{wet} = R_n - G_o - H_{wet}$  ( $\lambda E_{wet}$  为湿润地表的潜热通量,  $R_n$  为净辐射,  $G_o$  为土壤热通量,  $H_{wet}$  为湿润地表的感热通量)。这 2 种极端情况的假设,较好地反映出干旱区的水分和能量分布不均的特点,大大提高了蒸散发估算的精度。詹志明等<sup>[70]</sup>应用 SEBS 模型,估算了黄土高原的陆面蒸散发,结果表明估算结果合理。张薇等<sup>[71]</sup>在对河套地区蒸散发研究中采用了 SEBS 模型,结果表明 SEBS 模型能够在干旱区区域范围反演蒸散发。杨用民等<sup>[72]</sup>应用 SEBS 模型对黑河流域蒸散发进行了研究,结果表明:SEBS 模型估算结果是合理的。SEBS 模型的提出实现了通过卫星对地观测数据连贯估算大气湍流的通量值。但是,通过遥感数据反演的蒸发比却有很大的不确定性。由于在特定的陆面条件下,感热通量的主要影响因素可能不是有效能量的大小,而是当地地表温度或气象参数所决定,所以如果地表温度或气象参数存在不确定性,这将对作为结果的蒸发比有直接的影响。

### 3.2 传统方法与遥感方法结合模型

遥感技术可以提供大尺度的地面参数,因此估算蒸散发的传统模型利用遥感数据所提供的信息在时空尺度上得以扩展,其中应用最广泛的传统模型有以下几种:

#### 3.2.1 Penman-Monteith (P-M) 模型

P-M 模型的基本方程是:

$$\lambda E = \frac{[\Delta(R_n - G) + \rho C_p(e_s - e_a)/r_a]}{[\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)]} \quad (1)$$

$\lambda E$  为蒸散发量,  $G$  为土壤热通量,  $R_n$  为净辐射量,  $\Delta$  为饱和水汽压对温度的斜率,  $\rho$  为空气密度,  $C_p$  为定压比,  $e_s$  为温度为  $T$  时的饱和水汽压,  $e_a$  为水汽压,  $\gamma$  为干湿表常数,  $r_s$  为气孔阻抗,  $r_a$  为空气动力学阻抗。

P-M 模型综合了辐射和感热的能量平衡和空气动力学传输方程,有着坚实的物理基础。而遥感技术在 P-M 模型中的应用为其估算区域蒸散发提供了一种新的途径。Jackson 等<sup>[73]</sup>提出将遥感测量的地表参数和 P-M 公式结合的方法,经过 10 多年的发展证明是非常成功的。主要的步骤可以分为:①由遥感数据和地面气象资料结合 P-M 模型计算得到下垫面的潜在蒸散发;②通过遥感提供的地面参数,如地表温度、地表反照率和植被参数等,计算得到实际蒸散发和潜在蒸散发的比值系数;③将该系数与潜在蒸散发相乘即得到蒸散发的结果。在 P-M 模型中应用遥感反演得到大尺度的参数,使估算的结果更加精确。但 P-M 模型是对冠层结构的简化,在植被冠层郁闭的情况下估算精度较高,适合在干旱区农田作物蒸散发估算中使用。对于有多种植被存在的干旱区区域研究,P-M 模型的应用会受到限制。

而基于 P-M 公式的另一种方法,参考作物潜在蒸散发修正方法发展得也比较成熟<sup>[7]</sup>。但这种方法一般只是作为遥感技术估算干旱区蒸散发结果的地面检验方法。王菱等<sup>[74]</sup>通过研究也建立了相似的公式: $E_a = f1(S, K_c) \times E_0$ , ( $E_a$  为农田实际蒸散发,  $f1(S, K_c)$  为与土壤水分  $S$  和作物特征量  $K_c$  有关的函数,  $E_0$  是参考作物蒸散发)。

### 3.2.2 互补相关法

Bouchet<sup>[75]</sup>于 1963 年提出了陆面实际蒸散与潜在蒸散之间的互补关系的假设。这一假设为区域蒸散发的计算开辟了一条新的途径。目前基于互补相关原理估算区域蒸散发的模型主要有平流—干旱模型<sup>[76]</sup>、CRAE 模型<sup>[77]</sup>(Complementary Relationship Areal Evapotranspiration)和 Granger 模型<sup>[78]</sup>等。互补相关模型简化了蒸散发过程,规避了土壤—植被系统复杂的关系和作用,在估算区域蒸散发有极大的优势。Liu 等<sup>[79]</sup>利用平流—干旱模型在毛乌素沙地估算了当地的区域月蒸散发量,得到结论模型估算结果较大。周惠珍等<sup>[80]</sup>也应用同样的方法对毛乌素沙地蒸散发做了估算,结果表明平流—干旱模型的估算结果比实际测量偏小。尚松浩等<sup>[81]</sup>利用 CRAE 模型估算了干旱绿洲的月蒸散发量,结果精度较高。而对于这 3 种主要的互补相关模型的估算精度,刘绍民等<sup>[82]</sup>通过研究得到结果表明:平流—干旱模型适合估算月蒸散发量,而其他 2 种模型对于冬季蒸散发的估算有较大的误差。

### 3.2.3 统计经验模型

在干旱区,蒸散发最强烈的地区是绿洲农田地

区,其中 90% 的有效降水通过蒸散发耗散掉<sup>[2]</sup>。考虑到在农田地区植被蒸腾所占整个蒸散发的比例较大,所以有学者应用以 NDVI 作为主要参数的模型进行绿洲农田蒸散发的估算。Bella 等<sup>[83]</sup>和 Kerr 等<sup>[84]</sup>提出的模型是主要的代表。NDVI 能反映出植物冠层的背景影响且与植被覆盖和植物的蒸腾作用密切相关,蒸散发和 NDVI 之间存在较好的相关关系。但由于这类经验公式法对于日蒸散发甚至周蒸散发的估计都是无效的,只适合长时期蒸散发估算,适用性受到了极大的限制。

### 3.2.4 温度—植被指数特征空间法

植被指数和地表温度是描述陆面区域蒸散发最重要的参数,利用遥感反演获得的植被指数和地面温度以及这 2 种数据的融合,可以衍生出更为具体的蒸散发过程信息。近年来,利用遥感获得的植被指数—地表温度特征空间已被综合应用于估算区域蒸散发的研究中。Le 等<sup>[85,86]</sup>通过对植被指数—地表温度特征空间分析,估算出了 Priestley-Taylor 方程中的土壤湿度参数,并进一步计算了地表蒸散发量。Tang 等<sup>[87]</sup>在黑河流域利用 Ts-VI 特征空间法估算了该地区的蒸散发,结果表明估算结果与实测值相符合。

但不论是何种基于遥感的蒸散发模型,在估算过程中都还存在很多的问题,这些问题主要包括以下几个方面。

## 4 存在的问题

### 4.1 时间尺度问题

遥感技术估算干旱区蒸散发遥感是一种瞬时的观测手段,以能量平衡为主要研究理论基础的遥感方法所计算出的蒸散发量是瞬时值。而农业、气象和水文所需要的蒸散值至少以天为步长,月蒸散,生长季蒸散对蒸散实际乃至年蒸散的实际应用意义更大。目前时间尺度扩展的主要方法有 2 种:①简单的经验公式。Jackson 等<sup>[88]</sup>提出将瞬时蒸散量扩展到以天为步长的经验公式。Lagouarde 等<sup>[89]</sup>提出以天为步长和地方时 14 点的表面温度和气温差的线性关系。但这类经验时间扩展模型物理意义模糊,参数具有很大的经验性,模型的稳定性会有极大的不确定性。只有经过大量的研究验证和改进,根据研究地区的不同对其中的参数进行校正,方能推广应用。②蒸散比法。蒸散比法假设一天内潜热蒸散和其他有效能量蒸散之比是稳定的。首先,由于随着一天中不同时间的日照不同,在不同时刻气温、湿

度和风速等一系列的影响蒸散发的环境因素都会发生变化,尤其是昼夜之间,能量的分配就会有很大的变化,如果以某一瞬时的结果来扩展到一天的话,就会使整个研究的结果产生偏差,一般夜间的蒸发很少,因此可以忽略或用日间蒸发量间接估算,但如果长期计算的话,夜间蒸发必须考虑,否则会对研究的结果产生极大的误差。另外,即使在没有时间扩展的情况下,即只是对瞬时蒸散发进行估算,由于地面气象数据和通量观测结果都是一段时间的平均值,而遥感得到的数据是瞬时的结果,瞬时的遥感数据和地面观测的平均数据、时间尺度不一致,研究结果就会存在时间不匹配的问题。

#### 4.2 遥感估算蒸散发结果的检验问题

目前,波文比与涡度相关技术被证实是测定田间蒸散最有效的方法。而在景观和区域尺度大孔径闪烁仪(LAS)是主要的实测方法,近年来发展较快且应用日益广泛。大孔径闪烁仪可以用来测量 1 ~ 10 km 光径路线上的平均地表通量,用于地面验证可较好地与卫星像元尺度相匹配<sup>[90]</sup>。然而,这些检验方法都是以地面点的长时间测量来检验遥感瞬时数据计算而得到面上蒸散发的结果,存在空间和时间尺度不匹配的问题。而到现在仍然没有一个统一而且完全可靠的检验方法来对遥感估算的蒸散发结果进行评价,也无法对遥感的估算结果做出准确的评估,遥感在干旱区蒸散发研究中的应用得不到准确的误差反馈信息,这就意味着遥感技术估算干旱区蒸散发失掉了很多改进和完善的机会。贾贞贞等<sup>[91]</sup>针对地面实测检验和遥感估算结果尺度不匹配的问题,提出了基于地面观测的遥感监测蒸散量验证方法,但这种方法目前还只处于发展阶段,还有很多不足需要改进。

## 5 展 望

干旱区蒸散发问题已成为近年来学者们的研究热点。纵观已有的大量研究成果,其研究方法也在不断完善,但仍然存在许多问题需要进一步研究和探讨。今后的研究思路主要应涉及到以下方面:

(1) 作为干旱区蒸散发研究主要的信息来源,遥感能为干旱区遥感蒸散发提供计算模型所需要的参数:地表反照率、冠层叶面积指数和地表温度。但遥感技术自身的瞬时性,不能反映地表连续的蒸散发过程,而干旱区所应用的地表蒸散发模型是模拟连续地表水热过程,因而遥感数据与地表蒸散发模型的时间尺度问题是未来研究的方向。

(2) 遥感技术不能得到像元尺度的近地层大气的风速、温度、湿度等参数,所以干旱区蒸散发估算仍依赖地面点观测,由于地面观测是小尺度的观测,而遥感技术提供是区域尺度的地表参数,所以两者之间存在尺度不匹配的问题,要尽量减少地面观测对遥感估算蒸散发的影响,并且还进一步发展像元尺度非遥感参数的估算方法,如结合台站观测数据空间差值方法的优化,结合再分析数据的应用等。

(3) 在地面检验遥感蒸散发估算结果的方法中,目前,波文比、涡度相关技术和大孔径闪烁仪被证实是较为有效的方法。而在对于干旱区遥感蒸散发估算结果进行检验时,如果应用不同的地面检验方法,对于遥感估算干旱区蒸散发方法的评估也会产生很大的差异,而且基于不同检验方法的各种不同遥感估算方法的计算精度也没有可比性,这样遥感技术估算方法就失掉了很多改进和完善的机会。建立一个完全统一可靠的针对不同尺度的蒸散发检验方法,这对以后的干旱区蒸散发研究具有积极的意义和进一步的推动作用。除此之外,应用和优化大尺度地表蒸散发观测方法,以及发展和应用解决地面观测和遥感估算结果之间空间代表性匹配问题的模型,如足迹模型在验证中的应用<sup>[92]</sup>,都将是今后的研究重点。

#### 参考文献 (References):

- [1] Guo Xiaoyin, Cheng Guodong. Advances in the application of remote sensing to evapotranspiration research[J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(1): 107-114. [郭晓寅, 程国栋. 遥感技术应用于地表面蒸散发的研究进展[J]. 地球科学进展, 2004, (1):107-114. ]
- [2] Zhao Wenzhi, Cheng Guodong. Review of several problems on the study of ecohydrological processes in arid zones[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(5): 353-360. [赵文智, 程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J]. 科学通报, 2001, 46(22): 1 851-1 857. ]
- [3] Bowen L S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface[J]. *Physics Review*, 1926, 27(6): 779-789.
- [4] Thornthwaite C W, Benjamin Holzman. The determination of evaporation from land and water surfaces[J]. *Monthly Weather Review*, 1939, 67:4-11.
- [5] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil land and grass[J]. *Proceedings of the Royal Society of London (Series A)*, 1948, 193: 120-146.
- [6] Monteith J L. Evaporation and environment[J]. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 1965, 19: 205-234.
- [7] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration

- Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, 1998.
- [8] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. *Monthly Weather Review*, 1972, 100: 81-92.
- [9] Sun Jielun, Mahr L. Determination of surface fluxes from the surface radiative temperature[J]. *Journal of the Atmospheric Science*, 1995, 52(8): 1 096-1 106.
- [10] Shuttleworth W J, Wallance J S. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1985, 111(469): 839-855.
- [11] Dolman A J. A multiple-source land surface energy balance model for use in general circulation models[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 65: 21-45.
- [12] Choudhury B J, Monteith J L. A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1988, 114: 373-398.
- [13] Blyth E M, Harding R J. Application of aggregation model to surface heat flux from the Sahelian tiger bush[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 72: 213-235.
- [14] 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.
- [15] Monteith J L, Unsworth M H. Principles of Environmental Physics[M]. London: Edward Arnold, 1990.
- [16] Tateishi R, Ahn C H. Mapping evapotranspiration and water balance for global land surfaces[J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1996, 51: 209-215.
- [17] Zuo Dakang, Zhou Yunhua. Research on Earth Surface Radiation[M]. Beijing: Science Press, 1991:37-39. [左大康, 周允华. 地球表层辐射研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991:37-39.]
- [18] Liu Huihui, Tu Gang, Dong Wenjie. Characteristics of micrometeorology in the different surface layers over semi-arid area in Tongyu, northeast of China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(10): 1 220-1 227. [刘辉志, 涂钢, 董文杰. 半干旱区不同下垫面地表反照率变化特征[J]. 科学通报, 2008, 53(10): 1 220-1 227.]
- [19] Zhang Guo, Zhou Guangsheng, Yang Fulin. Analysis on dynamic characteristics of surface albedo over a desert steppe in Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica*, 2010, 30(24): 6 943-6 951. [张果, 周广胜, 阳伏林. 内蒙古荒漠草原地表反照率变化特征[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6 943-6 951.]
- [20] Wen Lijuan, Lü Shihua, Chen Shiqiang, et al. Observation study on diurnal asymmetry in surface albedo of oasis in arid region[J]. *Acta Energiæ Solaris*, 2009, 30(7): 953-956. [文莉娟, 吕世华, 陈世强, 等. 干旱区绿洲地表反照率不对称观测研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(7): 953-956.]
- [21] Wu Aisheng, Zhong Qiang. Relationships between global radiation surface albedo and solar elevation angle for several underlying surfaces in the HeiHe experimental area[J]. *Plateau Meteorology*, 1993, 2(5): 147-155. [吴艾笙, 钟强. 黑河实验区若干下垫面总辐射、地表反射率与太阳高度角的关系[J]. 高原气象, 1993, 2(5): 147-155.]
- [22] Chen Jiansui. The distribution and variation of the surface albedo in China[J]. *Acta Geographica*, 1964, 30(2): 85-93. [陈建绥. 中国地表反射率的分布及变化[J]. 地理学报, 1964, 30(2): 85-93.]
- [23] Chen Yunhao, Li Xiaobing, Xie Feng. Study on surface albedo distribution over northwest China using remote sensing technique[J]. *Scientia Geographica*, 2001, 21(4): 327-333. [陈云浩, 李晓兵, 谢锋. 我国西北地区地表反照率的遥感研究[J]. 地理科学, 2001, 21(4): 327-333.]
- [24] Xiao Yao, Zhao Lin, Li Ren, et al. The characteristics of surface albedo in permafrost regions of northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(3): 480-488. [肖瑶, 赵林, 李韧, 等. 藏北高原多年冻土区地表反照率特征分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(3): 480-488.]
- [25] Guo Jianmao, Yu Qiang, Wang Lianxi, et al. Study on regional distribution of land surface parameters and components of surface radiation balance over South Ningxia[J]. *Geographical Research*, 2007, 26(6): 1 127-1 136. [郭建茂, 于强, 王连喜, 等. 宁南地区地表特征参数及辐射平衡区域分布[J]. 地理研究, 2007, 26(3): 1 127-1 136.]
- [26] Zhang Jie, Zhang Qiang, Guo Ni, et al. Retrieval of the land surface albedo over arid oasis of Northwest China from EOS-MODIS data[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 29(4): 510-517. [张杰, 张强, 郭妮, 等. 应用EOS-MODIS卫星资料反演西北干旱绿洲的地表反照率[J]. 大气科学, 2005, 29(4): 510-517.]
- [27] Wang Jiemin, Gao Feng. Discussion on the problems on land surface albedo retrieval by remote sensing data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, 19(5): 295-300. [王介民, 高峰. 关于地表反照率遥感反演的几个问题[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(5): 295-300.]
- [28] Eastwood J A, Yates M G, Thomson A C, et al. The reliability of vegetation indices for monitoring saltmarsh vegetation cover[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(18): 3 901-3 907.
- [29] Dymond J R, Stephens P R, Newsome P F, et al. Percentage vegetation cover of a degrading rangeland from SPOT[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(11): 1 999-2 007.
- [30] Wittich K P, Hansing O. Area-averaged vegetative cover fraction estimated from satellite data[J]. *International Journal of Biometeorology*, 1995, 38(3): 209-215.
- [31] Quarmby N A, Townshend J R G, Settle J J, et al. Linear mixture modeling applied to AVHRR data for crop area estimation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(3): 415-425.
- [32] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1 533-1 543.

- [33] Mohammad A A, Shi Z, Ahmad Y, *et al.* Application of GIS and remote sensing in soil degradation assessments in the Syrian Coast [J]. *Journal of Zhejiang University (Agricultural & Life Science)*, 2002, 26(2): 191-196.
- [34] Zhu Xiaohua, Feng Xiaoming, Zhao Yingshi, *et al.* Scale effect and error analysis of crop LAI inversion [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(3): 579-592.
- [35] Xiaowen Li, Strahler A H. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of a conifer forest canopy [J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 1986, 24(6): 906-919.
- [36] Chen J M, Leblanc S G. A four-scale bidirectional reflection model based on canopy architecture [J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(5): 1 316-1 337.
- [37] Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, *et al.* Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83: 214-231.
- [38] Liang S L. Quantitative Remote Sensing of Land Surface [M]. New York: Wiley, 2004.
- [39] Gastellu-Etchegorry J P, Gascon F, Esteve P. An interpolation procedure for generalizing a look-up table inversion method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87: 55-71.
- [40] Fang Xiuqin, Zhang Wanchang. The application of remotely sensed data to the estimation of the Leaf Area Index [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2003, 57(3): 58-62. [方秀琴, 张万昌. 叶面积指数 (LAI) 的遥感定量方法综述 [J]. 国土资源遥感, 2003, 57(3): 58-62.]
- [41] He Lei, Tang Shuya, Miao Fang, *et al.* Remote sensing model and inversion of Leaf Area Index in the typical area of Minjiang valley upriver [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(1): 218-221. [何磊, 唐娅姝, 苗放, 等. 岷江上游典型流域叶面积指数的遥感模型及反演 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 218-221.]
- [42] Chen J M, Cihlar J. Retrieving Leaf Area Index of boreal conifer forest using Landsat TM images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55: 153-162.
- [43] Zhang Xiaoyang, Li Jinfeng. The Derivation of a Reflectance Model for the Estimation of Leaf Area Index using Perpendicular Vegetation Index [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1995, 10(3): 13-18. [张晓阳, 李劲峰. 利用垂直植被指数推算作物叶面积系数的理论模式 [J]. 遥感技术与应用, 1995, 10(3): 13-18.]
- [44] Qi J, Kerr Y H, Moran M, *et al.* Leaf Area Index estimates using remotely sensed data and BRDF models in a semiarid region [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 73: 18-30.
- [45] Fang H L, Liang S L. Retrieving Leaf Area Index with a neural network method: Simulation and validation [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 9: 2 052-2 062.
- [46] Jose A, Sobrino Juan C, Jiménez-Muñoz, *et al.* Land surface temperature retrieval from landsat TM5 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 434-400.
- [47] Ding Feng, Xu Hanqiu. Sensitivity analysis of mono-window and single-channel algorithms to the possible errors in parameter estimation [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2007, 32(1): 87-90. [丁凤, 徐涵秋. 单窗算法和单通道算法对参数估计误差的敏感性分析 [J]. 测绘科学, 2007, 32(1): 87-90.]
- [48] Qin Zhihao, Zhang M, Karnieli A, *et al.* Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from landsat TM6 data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 456-466. [覃志豪, Zhang M, Karnieli A, 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法 [J]. 地理学报, 2001, 56(4): 456-466.]
- [49] Jiménez-Munöz J C, Sobrino J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(22): 1-9.
- [50] Sobrino J A, Juan C, Jiménez-Munöz, *et al.* Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 434-44.
- [51] Anding D, Kauth R. Estimation of sea surface temperature from space [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1970, 1(4): 217-220.
- [52] Prabhakara C, Dalu G, Kunde V G. Estimation of sea temperature from remote sensing in the 11 to 12  $\mu\text{m}$  window region [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79(33): 5 039-5 044.
- [53] Price John C. Land surface temperature measurements from the split window channel of the NOAA7/AVHRR [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(5): 7 231-7 237.
- [54] Coll C, Caselles V, Sobrino J A, *et al.* On the atmosphere dependence of the split window equation for land temperature [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(1): 105-122.
- [55] Becker F. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, 8(10): 1 509-1 522.
- [56] Yin Nan, Zhou Yunxuan, Wang Liming, *et al.* An application of split window algorithm to the retrieval of land surface temperature with NOAA/AVHRR data [J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2005, 28(4): 8-11. [尹楠, 周云轩, 王黎明, 等. NOAA/AVHRR 的分裂窗算法在地表温度反演中的应用 [J]. 测绘与空间地理信息, 2005, 28(4): 8-11.]
- [57] Mao Kebiao, Qin Zhihao, Shi Jiancheng. Retrieval of land surface temperature of Shandong peninsula using MODIS image and split window algorithm [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2005, 34(1): 46-50. [毛克彪, 覃志豪, 施建成. 用 MODIS 影像和劈窗算法反演山东半岛的地表温度 [J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(1): 46-50.]
- [58] Qin Zhihao, Gao Maofang, Qin Xiaomin, *et al.* Methodology to retrieve land surface temperature from MODIS data for agricultural drought monitoring in China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2005, 14(4): 64-71. [覃志豪, 高懋芳, 秦晓敏, 等. 农业旱灾监测中的地表温度遥感反演方法-以 MODIS 数据为例 [J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 64-71.]
- [59] Wan Zhengming, Li Zhaoliang. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MO-

- DIS data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(4): 980-996.
- [60] Gillespie A R, Rokugawa S, Matsunaga. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(4): 1 113-1 126.
- [61] Mao Kebiao, Qin Zhihao. The transmission model of atmospheric radiation and the computation of transmittance of MODTRAN [J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2004, 27(2): 1-3. [毛克彪, 覃志豪. 大气辐射传输模型及 MODTRAN 中大气透过率计算[J]. *空间与测绘*, 2004, 27(2): 1-3.]
- [62] Jacob F. Comparison of land surface emissivity and radiometric temperature derived from MODIS and ASTER sensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(2): 137-152.
- [63] Zhao Xiaoyan, Shen Shuanghe, Yang Shenbin, et al. Land surface temperature of Nanjing retrieved from ASTER data [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2009, 32(1): 128-133. [赵小艳, 申双和, 杨沈斌, 等. 利用 ASTER 数据反演南京城市地表温度[J]. *南京气象学院学报*, 2009, 32(1): 128-133.]
- [64] Shi Qingsan, Xiao Jidong, Xiong Heigang, et al. Research on the cold-island effect—Base on the Qital Oasis[J]. *Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition)*, 2006, 23(3): 334-337. [师庆三, 肖继东, 熊黑钢, 等. 绿洲冷岛效应的遥感研究——以奇台绿洲为例[J]. *新疆大学学报:自然科学版*, 2006, 23(3): 334-337.]
- [65] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 1. Formulation[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, (212/213): 198-212.
- [66] Bastiaanssen W G M, Pelgrum H, Wang J, et al. A remote sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2. Validation[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, (212/213): 213-229.
- [67] Liu Zhiwu, Lei Zhidong, Dang Anrong, et al. Remote sensing and the SEBAL model for estimating evapotranspiration in arid regions[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(3): 421-424. [刘志武, 雷志栋, 党安荣, 等. 遥感技术和 SEBAL 模型在干旱区腾发量估算中的应用[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2004, 44(3): 421-424.]
- [68] Guo Yuchuan, Dong Xinguang. The SEBAL model for estimating regional evapotranspiration in arid regions[J]. *Remote Sensing Information*, 2007, (3): 75-78. [郭玉川, 董新光. SEBAL 模型在干旱区区域蒸散发估算中的应用[J]. *遥感信息*, 2007, (3): 75-78.]
- [69] Su Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6: 86-100.
- [70] Zhan Zhiming, Feng Zhaodong, Qin Qiming. Study on land surface evapotranspiration based on remote sensing data on Longxi Loess Plateau of China[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(1): 16-19. [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.]
- [71] Zhang Wei, Lin Wenjing, Wang Guiling. Study on the distribution of the real evapotranspiration in Hetao Plain based on remote sense[J]. *Remote Sensing Information*, 2009, (6): 28-31. [张薇, 蔺文静, 王贵玲. 基于遥感反演河套平原区域蒸发蒸腾量研究[J]. *遥感信息*, 2009, (6): 28-31.]
- [72] Yang Yongmin, Feng Zhaodong, Zhou Jian. Evapotranspiration in Heihe River Basin based on SEBS model [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2008, 44(5): 1-6. [杨永民, 冯兆东, 周剑. 基于 SEBS 模型的黑河流域蒸散发[J]. *兰州大学学报:自然科学版*, 2008, 44(5): 1-6.]
- [73] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indication [J]. *Water Resource Research*, 1981, 17(4): 1 133-1 138.
- [74] Wang Ling, Ni Jianhua. Research of actual evapotranspiration in farmland: A case study in Huanghuaihai River region [J]. *Acta Meteorological Sinica*, 2001, 59(6): 784-793. [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.]
- [75] Bouchet R J. Evapotranspiration reele et potentielle, signification climatique. Publ. General Assembly Berkeley [J]. *International Association of Hydrological Sciences*, 1963, 62: 134-142.
- [76] Brulsael W, Stricker H. An advection—Aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration [J]. *Water Resources Research*, 1979, 15(2): 443-450.
- [77] Morton F I. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology [J]. *Journal of Hydrology*, 1983, 66: 1-76.
- [78] Granger R J. A complementary relationship approach for evaporation from unsaturated surfaces [J]. *Journal of Hydrology*, 1989, 111: 31-38.
- [79] Liu S, Bai J, Jia Z, et al. Estimation of evapotranspiration in the Mu Us Sandland of China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14: 573-584.
- [80] Zhou Huizhen, Liu Shaomin, Yu Xiaofei, et al. Study on estimation of regional evapotranspiration by remote sensing in the Mu Us Sandland—A case study of Wushen County in Inner Mongolia [J]. *Progress in Geography*, 2006, 25(4): 79-87. [周惠珍, 刘绍民, 于小飞, 等. 毛乌素沙地蒸散量的遥感研究——以内蒙古乌审旗为例[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(4): 79-87.]
- [81] Shang Songhao, Sun Liyan, Hao Zengchao. Using complementary relationship to estimate monthly evapotranspiration in arid oasis [J]. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(3): 67-69. [尚松浩, 孙丽艳, 郝增超. 互补相关原理在绿洲月蒸发量估算中的应用[J]. *水文*, 2008, 28(3): 67-69.]
- [82] Liu Shaomin, Sun Rui, Sun Zhongping, et al. Comparison of different complementary relationship models for regional evapotranspiration estimation [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3): 331-340. [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, 59 (3): 331-340. ]
- [83] Bella C M Di, Rebella C M, Paruelo J M. Evapotranspiration estimates using NOAA/AVHRR image in the Pampa region of Argentina[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21 (4): 791-797.
- [84] Kerr Y H, Imbernon J, Dedieu G, *et al.* NOAA/AVHRR and its uses for rainfall and evapotranspiration monitoring[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, 10(4/5): 847-854.
- [85] Le J, Shafiqul I. A methodology for estimation of surface evaporation over large areas using remote sensing observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(17): 2 773-2 776.
- [86] Le J, Shafiqul I. Estimating of surface evaporation map over southern Great Plain using remote sensing data[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(2): 329-340.
- [87] Tang Ronglin, Li Zhaoliang, Tang Bohui. An application of the Ts-VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semiarid regions: Implementation and validation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114: 540-551.
- [88] Jackson R D, Hatfield J L. Estimation of daily evapotranspiration from one time of day measurement[J]. *Agricultural Water Management*, 1983, 7(1/3): 351-362.
- [89] Lagouarde J P, McAneney K J. Daily sensible heat flux estimation from a single measurement of surface temperature and maximum air temperature[J]. *Bound-Layer Meteorology*, 1992, 59 (4): 341-362.
- [90] Liu Shaomin, Li Xiaowen, Shi Shengjin, *et al.* Measurement analysis and application of surface energy and water vapor fluxes at large scale[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(11): 1 113-1 126. [刘绍民, 李小文, 施生锦, 等. 大尺度地表水热通量的观测、分析与应用[J]. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1 113-1 126. ]
- [91] Jia Zhenzhen, Liu Shaomin, Mao Defa, *et al.* A study of the validation method of remotely sensed evapotranspiration based on observation data[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(11): 1 248-1 260. [贾贞贞, 刘绍民, 毛德发, 等. 基于地面观测的遥感监测蒸散量验证方法研究[J]. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1 248-1 260. ]
- [92] Chávez J L, Neale C M U, Hipps L E, *et al.* Comparing Aircraft-based remotely sensed energy balance fluxes with eddy covariance tower data using heat flux source area functions[J]. *Journal of Hydrometeorology-Special Section*, 2005, 6: 923-940.

## Advances in the Application of Remote Sensing to Evapotranspiration Research in Arid Regions

Wang Guohua<sup>1, 2</sup>, Zhao Wenzhi<sup>2</sup>

(1. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** For gaining large-scale land surface characteristic parameters, remote sensing techniques have been widely used in the research of estimation of the evapotranspiration in arid regions. This paper introduces the methods of remote sensing technology providing surface characteristic parameters (surface albedo, leaf area index, surface temperature), and summarizes the main evapotranspiration models used to estimate regional evapotranspiration in arid regions. At last puts forward some main problems in the estimation process and the future development direction.

**Key words:** Remote sensing techniques; Surface characteristic parameters; Evapotranspiration in arid regions; Evapotranspiration model.