

卫星遥感监测 ET 方法及其在水管理方面的应用

孙敏章^{1,2}, 刘作新¹, 吴炳方³, 刘 钰⁴

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 4. 中国水利水电科学研究院水利所, 北京 100044)

摘要: 概述了利用遥感技术监测流域蒸发 (ET) 用于流域水管理的研究, 利用卫星遥感监测 ET 比传统地面监测 ET 方法具有更高的经济合理性和实用性; 通过遥感监测的 ET, 不仅可以对农业用水效率、灌溉系统性能作出更符合实际的评价, 还可服务于流域水资源管理和区域水资源利用规划。随着信息技术的快速发展, 卫星遥感监测 ET 的方法在水管理方面的应用前景广阔, 我国应加强对该技术的研究和应用。

关键词: 卫星遥感; 流域蒸发; 监测; 水资源; 管理和规划

中图分类号: TV213.4; TP79; G353.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2005)03-0468-07

流域尺度上的水循环包括降水、径流、地下水、蒸发等过程。其中, 空间分布不均的地表下垫面向大气传输的水分蒸散发 (包括土壤蒸发、水面蒸发和植物蒸腾, 即流域总蒸发, 简称 ET) 是陆面生态过程的关键参数, 也是流域水循环研究和水资源管理的重要因素。区域水资源管理的目的是保证区域水资源的供需平衡, 在水资源短缺地区就是要通过监测、评价和有效管理来减少耗水量, 实现水资源的高效利用。ET 是水资源最主要的消耗量, 同时也是农业灌溉管理的依据, 农业节水的目标就是要在提高农业产出的同时减少无效的水分蒸发。因此, ET 的监测对流域水资源管理、区域水资源利用规划和社会经济可持续发展研究至关重要。ET 是水资源管理中最重要控制要素之一, 也是最难以准确测定和评价的参数。利用遥感技术监测 ET 用于流域水量管理是国际上近几年开始采用的先进技术。本文介绍了利用遥感技术监测 ET 用于流域水量管理的国内外研究现状, 以为国内开展相关研究提供基础信息。

1 多波段卫星遥感技术发展现状

卫星遥感技术自 20 世纪 90 年代以来迅速发展, 一系列新的卫星发射上天, 其星载传感器的种类、探测精度、实用性能等等都远胜过去。与此相应, 包括 ET 监测的遥感应用也有了较大进展。

利用卫星遥感技术监测 ET 的各种模型所用的波段主要是可见光 (VIS)、近红外 (NIR) 和热红外 (TIR)。可见光和近红外遥感数据主要用来计算地表反照率和植被指数等地表参数, 热红外波段则主要用来计算地表比辐射率和地表温度; 地表反照率是控制地表可利用辐射能量并进而影响地表及低层大气加热率的重要参数; 地表温度表征了地气间能量和水分交换的程度; 植被指数反映了地表植被覆盖状况, 直接影响地表反照率、粗糙度、比辐射率等其它参数。

卫星接收到的辐射信号受到地面和大气的共同影响。以太阳辐射波段 (VIS/NIR) 为例, 卫星测得的辐射能量包括: 太阳光经地面的直接反射; 大气分子和气溶胶的散射; 反射的散射辐射; 背景贡献; 其

收稿日期: 2004-07-12; 修订日期: 2004-10-10

基金项目: 辽宁省科技攻关重中之重资助项目 (2001212001); 中国科学院知识创新重大工程资助项目 (KZCX3-SW-334)

作者简介: 孙敏章 (1968 -), 女, 山东龙口人, 高级工程师, 主要从事遥感技术在水管理中的应用研究。

E-mail: sunminzhang@mwr.gov.cn

中只有 是有用信号。对热红外波段(TIR),存在大气向卫星的直接辐射和大气向下辐射经地面目标物的反射。所以,在反演地表参数时必须尽量消除大气的影响,即进行大气订正。

可用作 ET 监测的卫星包括地球同步气象卫星(如 GMS, FY-2 系列等),极轨气象卫星(NOAA 系列, FY-1 系列等),陆地资源卫星(Landsat 5 和 7 等),以及近年上天的 EOS 系列卫星(Terra, Aqua 等)。不同的卫星,其探测波段的数量、位置和波谱分辨率不同,过境的时间频度、地面分辨率也不同。由地球同步气象卫星(如 GMS),可获得每小时甚至每半小时的遥感图像,图像的地面覆盖范围也大,利于作日变化等快速监测;但其探测波段较少,特别是地面分辨率太低(地面象元 5 km),难以作较为精细的业务化应用。Landsat 卫星的 VIS/NIR 各波段的地面分辨率为 30 m, TIR 波段的地面分辨率也可达 120 m(TM)或 60 m(ETM+),利于用作精细的研究和监测检验等,但其过境时间每 16 d 才有一次,难以作日常的业务化应用。较为折中的是 NOAA/AVHRR 资料或近年上天的 Terra(以及 Aqua)MODIS 资料。利用这些卫星,同一地区每天都可收到不少于两次遥感图像。AVHRR 的地面分辨率为 1.1 km, MODIS 的地面分辨率对不同波段分别为 250 m、500 m 和 1 km,在 0.4~14.4 μm 共有 36 个波段,MODIS 资料不仅地面分辨率高,波段数也远比 AVHRR 的多,有的波段的波长选择可使之用于特殊的探测目的(如反演大气可降水量和气溶胶);各波段波长范围窄(如反演植被指数的 MODIS 波段 1 和 2 与 AVHRR 的波段 1 和 2 的比较),因而更有利于避开大气吸收带的影响,提高探测相应参数的灵敏度。

2 传统地面监测 ET 方法与遥感监测技术对比

2.1 传统地面监测 ET 方法的局限性

传统计算蒸散发量的方法,大致可分为基于温度的计算方法,基于辐射的方法和基于两者结合的著名的 Penman 计算方法,这些方法都是在先计算潜在蒸散发量的基础上,然后与作物系数相乘,最后计算出作物实际蒸散发量。Bowen^[1]根据能量平衡方程,提出了计算蒸发的波文比——能量平衡法;Thomthwate 和 Holzman^[2]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;Monteith^[3]在研究作物的蒸发和蒸腾中引入表面阻抗的概念,导出了 Penman-Monteith 公式;传统地面监测 ET 大多在灌溉试验站进行,观测方法是在农田选择固定点,按规定的时间和层次,量测土壤含水量的变化,分阶段统计水分消耗量,得出各种作物不同发育阶段及全生长期的 ET。根据测得的 ET,就可设计作物的灌溉制度和灌溉用水量。上述观测 ET 的方法在我国已有数十年的历史,积累的资料为灌区规划设计,开展计划用水,以及流域和地区水利规划提供了科学依据。但是,将这种观测方法用于区域水量平衡分析则具有相当的局限性:

(1) 由于是人工操作,布点很有限,且只是针对粮、棉、油料等主要农作物开展观测,其它植被如杂粮、园艺、树木、草地等研究甚少;

(2) 由于土壤的物理化学性质和水分状况的空间变异性比较大,所以定点测定的土壤含水量和观测的作物 ET 值结果存在较大误差;虽然在试验站的观测地块上,可用多点取样办法,减少观测误差,但将试验站上小面积的观测数值推广到大区域应用时,仍然难免产生较大误差;

(3) 研究流域和地区的水资源问题,不仅要取得农田灌溉用水、工业用水和城乡人畜用水的数据,也要取得各种环境因素的耗水数据,而环境耗水数据至今研究甚少,缺乏适当的观测方法和基础资料。

2.2 遥感监测技术的先进性

实际上蒸散发在时间上和空间上是高度变化的。在空间上变化是由于降水、土壤水文参数以及植被类型和密度具有很强的空间变异性;在时间上变化是由于气候在不同时期的不断变化。传统的方法对反映 ET 的时空变化有很大的局限性,这些局限促使人们用卫星遥感影像在大尺度区域上来估算 ET。采用遥感技术监测 ET 与传统的地面实测相比,具有更高的经济合理性和实用性:

(1) 利用卫星遥感监测 ET,比人工观测省工、省力,取得资料及时;

(2) 利用卫星遥感监测 ET,不仅克服了人工测土壤水分变化和以点代面计算 ET 产生的误差,而且直接反

映了土地使用类型, 植物生长状况与环境 and ET 的关系, 遥感数据得到的结果较少受人为因素影响, 因而更加符合实际。

(3) 人工观测 ET, 受人力、资金和时间等诸多因素限制, 只能观测少数几种作物的 ET, 而空间遥感技术具有时空的连续性和大跨度, 地面站点的观测结果可以通过卫星遥感扩展到整个流域, 结合详细的灌区作物分布图, 不仅可对包括小品种作物在内的各种植被的 ET 进行监测, 还可对从区域到农田不同尺度上的 ET 进行监测。

(4) 遥感以系统化的方式搜集信息, 并能形成长时间序列, 这些信息能通过地理信息系统进行空间描述, 便于相互比较和管理。可使水资源管理由过去的粗放型走向科学化。

因此, 引进和采用卫星遥感监测 ET 技术, 对传统的 ET 观测方法加以改进, 使之应用于我国流域和区域水资源与水环境综合管理, 是十分必要的, 也是可行的。

3 遥感监测 ET 方法研究现状

目前国际上广泛采用的利用遥感技术估算 ET 方法可分为 3 类: 与传统地面监测和计算相结合的方法; 与水文模型相结合的方法; 基于地表能量平衡方程的方法。

3.1 与传统地面监测和计算相结合的方法

在 ET 计算过程中, 有些学者虽然利用了不同类型的遥感数据, 但由于遥感数据应用程度不高, 很多数据还需进行地面观测, 所以这些方法只能称为“半遥感蒸散发估算模型”。Ray 等^[4]利用遥感影像对研究区域作物进行了分类并确定了每一类作物的作物系数, 然后利用地面监测“点”上计算的潜在蒸散发进行插值, 而后再用传统方法计算作物实际蒸散发量:

$$\text{作物实际蒸散发量} = \text{作物系数} \times \text{潜在蒸散发量}$$

Granger^[5]通过基于回归关系分析计算表面温度的遥感方法, 利用卫星影像数据对土耳其 Gediz 流域进行了蒸散发量的估算, 其中遥感模型与传统模型相结合使用, 并用仪器观测数据对计算蒸散发的输入变量进行了验证。

3.2 与水文模型结合的方法

有些学者将遥感数据与水文模型结合起来进行遥感蒸散发研究。Caselles 等^[6]在西班牙 Barrax 地区利用气象数据、Landsat TM 和 NOAA/ AVHRR 遥感影像, 通过 TM 图像生成作物分布图, 按照作物特征参数提取每种作物的半经验系数 B , 而后通过方程 $ET = ET_m - B(T_s - T_{sm})$ 来得到小麦、玉米作物每天的蒸散发量图, 由于该方法是假定地表完全被植被覆盖而建立的单层模型, 所以对于部分覆盖的地表, 参数 B 不能看成是一个常量, 必须根据作物几何特征来确定具体的差值。1988 年 Greind 等^[7]研究了在干旱半干旱地区用卫星遥感和水量平衡模式估算水平衡的方法。Tateishi 等^[8]通过简化的水量平衡方程和全球每月的遥感数据作出了全球蒸散发量分布图。Chen 等^[9]采用 NDVI-DSTV (Diurnal Surface Temperature Variation) 三角模型, 使用 NOAA/ AVHRR 遥感影像计算了 Florida 地区的蒸散发量。Keur 等^[10]对 SVAT 模型进行了改进, 这样就提高了利用遥感数据估算蒸散发量和光合作用的精度。

3.3 基于地表能量平衡方程的方法

荷兰 Bastinnassen 等^[11]提出了适用于估算陆地复杂表面的蒸散发量的 SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) 模型。该模型是应用遥感影像收集到的可见光波段、近红外和热红外波段信息对大区域范围进行蒸散发量的估算, 包含了 25 个计算子模块。其理论基础是地表能量平衡方程为

$$R_n = LE + G + H$$

式中 R_n 为地表净辐射通量, W/m^2 ; LE 为潜热通量, W/m^2 ; G 为土壤热通量, W/m^2 ; H 为显热通量, W/m^2 。

SEBAL 模型利用遥感进行地表参数反演，如地表反照率、地表温度、地表比辐射率，进而求出地表净辐射通量 R_n 、土壤热通量 G 和显热通量 H ，便可以计算蒸发系数。通过假定在整个 24 h 内蒸发系数是一个常数就可以估算影像获得当天的蒸散发量，如果选择合适的影像还可以推算出作物整个生长季节的总蒸散发量。SEBAL 对蒸散发量的计算是基于单个像素，因此它的计算结果能以地图的形式可视化显示。

把野外实验测量和 SEBAL 模型得到的 ET 值进行比较，精度在 85 % 左右，误差在测量仪器的误差范围之内。最近美国 Idaho 水利部门对 SEBAL 进行了两期的地面验证，每个季节相对误差为 4 %，在整个作物生长期，由于误差的随机性和相互抵消的原因，SEBAL 模型的 ET 估算误差少于 1 %。

Carlson 等^[12]用下列遥感模型对日蒸散发进行了研究：

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

式中 R_{n24} 为 24 h 的净辐射； LE_{24} 为日蒸散发； T_{013} 和 T_{a13} 分别为在当地时间 13 00 的表面辐射和空气温度； B 和 n 为常数，它们是 NDVI 的函数，NDVI 和 T_{a13} 由遥感数据获得。

3.4 我国遥感监测 ET 方法研究进展

我国在利用卫星遥感资料估算非均匀陆面区域蒸散发量的研究方面起步较晚。钟强、吴艾笙等^[13~15]利用卫星遥感资料对多种地表特征参数进行了大量的研究。1990 年田国良等^[16]用 NOAA/ AVHRR 资料和地面气象资料估算了作物蒸散和土壤的含水量。郭亮等^[17]利用气象卫星 NOAA/ AVHRR 数据得到的归一化植被指数来宏观监测蒸散发量，并选择同时具有各类典型生态类型的敏感区进行实验。陈乾等^[18]曾尝试了一种用 NOAA/ AVHRR 影像、海拔高度和气象观测数据估算江河流域复杂地形蒸散量的方法。1995 年王介民等^[19]在“黑河地区地气相互作用实验研究”(简称黑河实验, HEIFE)的基础上,分析了整个“黑河实验区”的地表反射率、归一化植被指数(NDVI)、地表温度以及能量平衡各分量和蒸散发量的区域分布及定量统计特征。1996 年马耀明等^[20]给出了夏季和近冬季两个季节“黑河实验区”非均匀陆面上区域蒸散发量分布及统计特征。

综上所述，由于区域水资源管理的需求，利用卫星遥感资料估算区域 ET 已成为国内外研究的热点，近 10 多年来已有多种方法问世。这些方法有的相对简单，如只由多波段遥感资料计算地表可利用辐射能量分布，进而利用传统的 Priestley-Taylor 公式或互补相关模型等推算 ET；有的较为复杂，如包含感热通量的详细估算等；有的只利用同步气象卫星资料，地面分辨率偏低，但时间分辨率较好；有的则利用较精细的 Landsat TM 或 NOAA/ AVHRR 等资料，结果较精确。在计算模型方面，除简单的统计模型外，大多为物理模型，而且繁简程度差别很大。各模型的共同点在于，都需要首先利用遥感信息反演地面反照率和地表温度，再求得地表可利用能量($R_n - G$)，然后或者利用简单的参考蒸腾蒸发量公式计算 ET，或者首先推算感热通量 H ，再利用能量平衡方程计算 ET。其中荷兰 Water-Watch 为主开发的基于陆面能量平衡方法的 SEBAL 模型，物理基础较为坚实，近年在欧美和亚非国家有许多成功应用的例证^[14]。

4 遥感监测 ET 在水管理领域的应用前景^[21,22]

遥感能够为决策管理者、研究人员和公众提供与水资源相关的重要信息。这种信息在立法、规划和水资源分配、性能及影响评价、调查研究以及健康和环境相关的领域，都有应用潜力。遥感根据不同的精确等级，能够在土地利用、灌溉区域、作物类型、生物体发育、作物产量、作物需水量、作物蒸腾蒸发、盐碱化、旱涝灾害和河水径流方面提供有用信息，这种信息当体现在管理方面时，能够对规划和评价目的产生极大的价值。

4.1 用水效率

随着用水紧张的加剧，了解用水的方式是很重要的。水资源是在何时、如何被消耗的？节水的时机在哪里？如何提高用水效率？如何在一个给定的系统中对水进行最佳分配，以提高整个系统的生产率？水利利用研究过去只注重于流域水利用中的各个用户以及各用户的利用效率，而忽视了流域内不同用水部分之间的联系。尽管这些问题能通过水平衡来解决，但其平衡结果则依赖于输入数据的正确性。遥感估算 ET 值后，与土地类型分类相结合，可得到非作物植被蒸发的水量、农田和蔬菜等作物的蒸散发量等，进而评估各土地类型的 ET 和

水的利用模式。把遥感估算的 ET 和作物产量结合起来,可得到水的生产力变化。

4.2 灌溉系统的性能评价

理想的灌溉管理系统,在其管理技术中包含有定期的监测手段。在大范围复杂地区,遥感估算的 ET 值在诊断灌溉系统性能并建立灌溉监督措施方面是极具价值和高效的工具。通过遥感估算 ET 值,可以看出土地和水资源生产力的空间变化,然后将地面观测资料与 GIS 环境下的水文模型结合起来,可对其变化差异做出解释,从而发现在生产力方面的差异原因,进而分析灌溉效果。用同一卫星数据估算的 ET 可用于比较不同灌溉系统的性能,分析不同气候和不同地区的作物密度、 ET 和作物胁迫的空间变化系数。空间变化系数常被用于评价使用水资源和使用灌溉设施的平衡状况。所有这些分析均采用相同的能量平衡方法,使用 30 m 分辨率的 TM 数据来分析,可确保取样、测量和解译技术相近,有利于进行比较。

4.3 规划和水权

随着水资源短缺压力的日益增加,用水模式也处在不断变化之中。关键是要重新思考并制定长期规划,来应付面临的挑战,而且必须通过立法和政策来实施长期的战略规划。

用水规划要求有准确的灌溉面积、作物模式、 ET 和水利用的历史数据信息。而来自地表的信息常常依据的是设计数据而不是实际数据。在大多数国家,有关灌溉面积的数字在统计和实际之间有很大差异,这些差异有的高达 40%~70%。农民们常常是依据可利用水(包括地下水)的状况来实行耕作,从而使得实际状况与规划情形完全不同。这里,遥感则提供了适于区域水利用规划的好方法。

水权,在水分配以及确定谁有权获得水供应方面是关键因素。建立水权体系的两个基本问题:一是水权的定义,二是权利的裁定。一旦建立起水权体系,可依据遥感手段得到的水利用数据,并确定哪些个人和群体在当前和以往的用水量方面发挥了多大作用。而且,在水权完善后,就可以核查水利用量情况,而这可通过植被覆盖的遥感评估,并结合有关水权的地理数据库来实施完成。

遥感也为费用筹集和规章法则的实施提供了支持。有时,水量使用是依据不同作物以及不同作物面积来确定的,项目实施情况通过遥感可一目了然。在一些缺水地区,可通过禁止某些作物种植和地下水使用,或只允许农民使用有限数量的地下水的方式,以保护地下水资源。

4.4 运行管理

效果评价是高效灌溉管理的基本组成部分。来自田间信息的定期反馈可充分提高水利用效率,然而,获取有关实际田间状况的客观评价是困难的。现在,在一定条件下遥感则提供了解决问题的可能性,即对 100 hm^2 面积大小的单元区域进行重复监测。通过定期监测田间湿度指标,管理者可在整个灌溉季节对灌溉方案进行不断的修正。对于那些只负责供水的灌溉系统,监控将有助于管理者从监测的信息中发现预定灌溉方案的偏差,从而诊断分析出现偏差的原因,并相应地提出调整供水方案。

定期的效果评价对明确权利责任也是必要的,它可确保服务规范到位。遥感信息以其客观公正,在确定实际提供的服务是否符合规定要求时扮演着重要角色。灌溉系统的水分配多数是依据灌溉面积、作物类型、气象条件和作物的需水量来决定,灌溉渠道的能力则是依据满足一定比例的作物需水量的最大流量而确定。遥感则能定期更新灌溉区域,从而减少与灌溉区域的原先估计值的偏差。种植模式也可能会由于市场机制、旱涝状况而发生改变,即使是根据需要供水的灌溉系统,有关田间状况,包括作物水分胁迫方面的信息都有助于管理者预知应该从水库释放或调节多少水量。

4.5 影响评价

以不同方式投入到灌溉排水建设中的巨额资金,促进了灌排事业的发展,但哪些设计工作应该继续或完善,哪些应停止?取得成功依赖什么?这些问题常常不能得到充分回答,因为缺乏实地信息以及长时间变化状况的可靠信息。遥感在这方面能发挥出自身巨大的优势,如存储的数据资料能用于估计历史阶段的 ET 值,探究较长时段所发生的各种变化。

工程影响评价要求将灌溉实施以前和工程执行以后的情形进行比较。如灌溉工程交付使用以后,可用遥感

对工程投入前后的耕作面积、稻田面积和作物产量进行监测估算, 量化了灌溉工程实施的影响、单位水量生产力的变化、灌溉面积的变化、作物种植结构的变化等, 从而对工程投资进行影响分析。

4.6 流域水平衡

在世界的大部分地区, 水用户群体之间的竞争已经开始。而且水需求还可能超过水供给。世界许多流域, 甚至是湿润气候条件下的河流, 都面临着水短缺的威胁。尽管水资源管理很重要, 现有的农业和环境系统的耗水量数据仍然是不充分的(环境系统是指所有的自然植被系统包括诸如沼泽地和野生动植物保护区之类等)。另一方面, 对自然生态系统的水需求、水利用和水可用性的知识仍相当有限。基于遥感的 ET 估算, 为获取农耕地包括流域内所有地区的用水信息提供了可能, 并能迅速对流域水状况作出客观评价, 从而为政府决策提供了及时的服务。

流域中的所有水用户在水文方面都是相互联系的, 水的再分配也将影响着其他用户。上游的开发如森林采伐、灌溉现代化, 以及不断扩展的城市化和工业化发展, 将影响到下游沿河地区。那些最初看起来是无害于生态但实际上是违背环境规律的人类活动, 很可能已对其他地区的环境产生不利影响, 旨在提高上游地区生物多样性和减少土壤侵蚀的农林复合体, 很可能导致沿海地带区域动植物的灭绝。优质水的滥用和分配不当会造成盐碱化或涝渍而破坏耕地资源, 并对其他生态系统和湿地构成威胁。水资源在农业和自然生态系统的合理平衡分配是水管理中的一个基本问题。

5 结 论

与传统地面监测 ET 方法相比, 利用卫星遥感技术监测 ET 是一种技术可行、精度较高、可实现大范围监测的先进方法。通过遥感监测的 ET, 可以对农业用水效率、灌溉系统性能作出切合实际的评价, 以便为合理调整作物种植结构, 进行节水灌溉提供科学依据。ET 的监测还为政府部门进行流域水资源管理和区域水资源利用规划提供决策依据。随着可利用水资源的日益减少, 通过采用遥感技术监测 ET 实现对区域水资源状况进行实时监控和管理的需求十分迫切, 我国应加强对该技术的研究和推广应用。

参考文献:

- [1] Bowen Is. The ratio of heat losses by conduction and evaporation from any water surface[J]. *Phys Rev*, 1926, 27:779 - 798.
- [2] Thornthwait C W, Holzman A. Report of the commutation on transpiration and evaporation[J]. *Transactions of the American Geophysical Union*, 1944, 25:683 - 693.
- [3] Monteith J L. *Environmental control of plant growth*[M]. New York: Academic Press, 1963. 95 - 112.
- [4] Ray S S, Dadhwal V K. Estimation of crop evapotranspiration of irrigation command area using remote sensing and GIS[J]. *Agricultural water management*, 2001, 49:239 - 249.
- [5] Granger R J. Satellite-derived estimates of evapotranspiration in the Gediz basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 229:70 - 76.
- [6] Caselles V, Artigao M M, Hurtado E, et al. Mapping Actual Evapotranspiration by Combining Landsat TM and NOAA-AVHRR Images: Application to the Barrax Area, Albacete, Spain[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 63(1):1 - 10.
- [7] Griend A A Van De, Gurney R J. Satellite remote sensing and energy balance modeling for water balance assessment (semi-) arid regions. In: I Simmers ed. *Estimation of natural ground water recharge*[M]. D Peidel Publishing company, Dordrecht, the Netherlands, 1988, 89 - 116.
- [8] Tateishi E, Ahn C H. Mapping evapotranspiration and water balance for global land surfaces[J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1996, 51:209 - 215.
- [9] Chen J H, Kan C E, Tan C H, et al. Use of spectral information for wetland evapotranspiration assessment[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 55:239 - 248.
- [10] Keur P van der, Hansen S, Schelde K, et al. Modification of DAISY SVAT model for potential use of remotely sensed data[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 106:215 - 231.
- [11] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 1 formulation[J]. *Journal of Hydrology*, 1998(212 - 213):198 - 212.

- [12] Carlson T N, Capehart W J, Gillies R R. A new look at the simplified method for Remote Sensing of daily evapotranspiration[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54:161 - 167.
- [13] 钟 强, 吴士杰. 利用 AVHRR 资料推算青藏高原地区地表反射率的方法[J]. *高原气象*, 1985, 4(3):193 - 203.
- [14] Zhong Qiang, Li Yinhai. Satellite observation of surface albedo over Qinghai-Xizang Plateau region[J]. *Advances in Atmospheric Science*, 1988, 5:57 - 65.
- [15] 吴艾笙, 钟 强. 黑河地区的地表反射率与植被指数[J]. *大气科学*, 1993, 17(2):155 - 162.
- [16] 田国良, 郑 柯. 用 NOAA/ AVHRR 数字图像和地面气象站资料估算作物蒸散和土壤水, 黄河流域典型地区遥感动态研究[M]. 北京:科学出版社, 1990. 5 - 10.
- [17] 郭 亮, 杜 鹏, 肖乾广, 等. 用气象卫星遥感方法监测中国季风区气候敏感带蒸散量的年际变化[J]. *植物学报*, 1997, 39(9):841 - 844.
- [18] Chen Qian, Chen Tianyu. Estimation of river basin evapotranspiration over complex terrain using NOAA AVHRR[R]. *Elevation and meteorological data*, HEIFE Report No. 6, 1991.
- [19] Wang J, Ma Y, Menenti M, *et al.* The scaling-up of process in the heterogeneous landscape with the aid of satellite remote sensing[J]. *J M Mete of Japan*, 1995, 73(6):1235 - 1244.
- [20] Ma Y, Pelgrum H, Rorink G. Regionalization of surface flux densities and seasonal variation in the heterogeneous landscape of HEIFE, Internal Mete 422, The Winand Staring Centre (SC-DLO) [M]. Wageningen, the Netherlands, 1996.
- [21] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, *et al.* Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 46:137 - 155.
- [22] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, *et al.* Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 1779:1 - 22.

Monitoring method of evapotranspiration by remote sensing and its application in water resource management^{*}

SUN Min-zhang^{1,2}, LIU Zuo-xin¹, WU Bing-fang³, LIU Yu⁴

(1. *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; 2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*; 3. *Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*;
4. *Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China*)

Abstract : A review of advances in the monitoring method of evapotranspiration (ET) by the remote sensing data and its application in river water resource management is presented in this paper. Compared to the traditional field work, the method has the characteristics of better economic rationality and practicability. The estimated ET based on the remote sensing is not only useful for evaluating agricultural water use efficiency and irrigated system performance, but also helpful for managing river water resource and planning regional water resource utilization. With the development of information technology, the monitoring method of ET by the remote sensing shows a bright future in water management and is a valuable technology worthy of being researched further and applied widely in China.

Key words : remote sensing; evapotranspiration; monitoring; water resource; management and planning

* The study is financially supported by the Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KZCX3-SW-334).