

利用遥感监测ET技术 研究与应用

中国灌溉排水发展中心
水利部GEF海河项目办公室 主编



中国农业科学技术出版社

利用遥感监测 *ET* 技术研究与应用

中国灌溉排水发展中心

水利部 GEF 海河项目办公室 主编

中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

利用遥感监测 *ET* 技术研究与应用/中国灌溉排水发展中心等主编 .—北京: 中国农业科学技术出版社, 2003.9
ISBN 7-80167-545-2

I . 利… II . 中… III . 遥感技术 - 应用 - 土壤蒸发 - 监测 IV . S152.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 071256 号

责任编辑
责任校对
出版发行

经 销
印 刷
开 本
印 数
版 次
定 价

闫庆健
马丽萍 贾晓红
中国农业科学技术出版社 邮编: 100081
电话: (010) 62187620; 传真: 68919698
新华书店北京发行所
北京奥隆印刷厂印刷
787mm × 1092mm 1/16 印张 · 9.125
1 ~ 2200 册 字数: 222 千字
2003 年 9 月第一版, 2003 年 9 月第一次印刷
32.00 元

前 言

中国面临日趋严重的水资源危机，尤其是在北方干旱、半干旱地区水资源危机问题更加突出。众所周知加强水资源统一管理尤为重要，我国政府有关部门的高级管理层已将此列为优先考虑事项。

就海河流域而言，水资源短缺和水环境恶化尤为突出。海河流域治理部门把水生态恢复列为工作目标，其核心是对水资源与水环境进行综合管理，其中资源节水（“真实”节水）是首要任务。

为推进海河流域水资源与水环境综合管理，要求实现水资源合理配置，提高水资源利用效率，并以修复生态系统、有效缓解水资源短缺、减轻流域陆源对渤海污染和真正改善海河流域及渤海水环境质量为目标。经世界银行和财政部商定，由水利部和国家环保总局共同申请全球环境基金（GEF），开展海河流域水资源与水环境综合管理资助项目和实施。目前，该项目前期准备工作已展开。在 GEF 海河项目实施中，世界银行众多专家大力推荐近几年一些国家正在采用的卫星遥感监测 ET （蒸发蒸腾量）技术与方法，过去采用的常规 ET 监测技术得到改进，并可解决人工监测解决不了的一些问题。鉴于研究 ET 时空分布并对其施加影响，是研究水资源合理配置的重要内容，所以世界银行项目准备团强调在海河流域水资源与水环境综合管理项目中，把建立和运行遥感技术监测 ET 系统列为重要内容。此项新技术的引进和推广应用，对海河流域乃至加强全国流域、区域水资源与水环境综合管理，都具有十分重要的现实意义。

我国开展 ET 监测并应用于生产，始于 20 世纪 50 年代，当时各省（区、市）均设置了灌溉试验站，观测不同作物的耗水量（ ET ）、变化规律和影响因素。大部分试验站观测方法，则是采取测定作物根系吸水层土壤的水分变化，并以此计算作物不同发育阶段及全生长期的耗水量。少数试验站安装了蒸渗仪，以研究大气、植物、土壤和地下水的 4 水转化规律。50 多年来各地试验站积累了丰富的资料，为当地灌区建设、管理及水资源规划，提供了科学依据。但是，以往的试验研究和人工监测 ET 有很大的局限性，有必要寻求更高效和可行的办法，在不同尺度的区域内进行全面、系统、连续的 ET 监测。随着卫星遥感技术和计算机软件开发应用技术的突飞猛进，使用现代技术手段监测 ET 也更方便快捷和有现实可能。在利用 SEBAL 模型处理多光谱卫星遥感图像监测 ET 方面，国内外试验和初步应用均表明，它可作为一种有效的、精度较高的和成本相对低廉的方法与程序，用以估算流域和区域的 ET 值，其中也包括灌溉耕地上农作物的 ET 和自然系统的 ET 等。

为引进和有效利用此项新技术，中国灌溉排水发展中心和水利部 GEF 海河项目办公室于 2003 年 2 月 17~18 日，召集各有关单位及国内外有关专家，就卫星遥感监测 ET 技术应用和资源节水等问题进行专题研讨，并形成了一批高质量的论文。现将这些论文加工汇编成书，供各级水利部门专业人员学习交流与参考。

由于卫星遥感技术监测 *ET* 的方法，在国内外流域水资源规划管理中的应用时间不长，国内水利界熟悉此项技术和情况的人员不多，而有关资源节水（“真实”节水）新概念也是近几年在农业节水和水资源规划管理领域新近提出和逐步完善的理论与实践。这些水资源规划管理方面的新理念、新技术和新方法，有待实践中不断探索、完善和逐步得到各方面的理解与接受。

由于本书编写较为仓促，难免有疏漏之处，敬请读者及时提出宝贵意见。

编者

2003 年 5 月

目 录

前言

SEBAL 模型及遥感监测 ET (蒸发蒸腾量) 的应用分析	吴炳方 (1)
流域尺度 ET (蒸发蒸腾量) 的遥感反演	王介民 (8)
黄河流域蒸散量估算研究	刘绍民等 (18)
利用表面能量平衡原理遥感监测 ET (蒸发蒸腾量) 在蛇河平原的应用 Richard GA, Anthony M, Masahiro T, Ricardo T 著	孙敏章 刘 钰 王介民译校 (28)
遥感在灌溉农业中研究和可行性应用实例 Bastiaanssen, W G.M.Molden, D.J.Makin IW 著	孙敏章 刘 钰 王介民译校 (37)
遥感技术在中国水环境监测与水资源管理中的实践	路京选 (49)
论引进卫星遥感监测 ET (蒸发蒸腾量) 技术的必要性	田 园 (63)
地下水资源可持续利用——资源节水基本概念	蒋礼平 (66)
关于世行贷款节水灌溉项目目标监测评价指标体系的说明	田 园 (70)
田间实测和评价作物 ET (蒸发蒸腾量) 方法及其应用	刘 钰 (75)
海河流域农田“真实”节水措施与对策	李志宏 (98)
关于“真实”节水、科学灌溉和 ET (蒸发蒸腾量) 监测的几点看法	李会昌 (119)
墒情预测、科学灌溉方法及其应用研究	李会昌等 (125)
潜水 ET (蒸发蒸腾量) 变化过程的数值模拟	束龙仓 CHEN XH (135)

SEBAL 模型及遥感监测 ET (蒸发蒸腾量) 的应用分析

吴炳方

(中国科学院遥感应用研究所)

SEBAL 模型是由荷兰 Water-Watch 公司 W. G. M. Bastinnassen 先生开发的基于遥感的陆面能量平衡模型, 用于估算陆地复杂表面的蒸发蒸腾量 (ET)。该模型在西班牙、尼日尔和中国等地进行了精度检验。野外实验测量和 SEBAL 模型获得的各 ET 值进行比较, 其精度约 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 2 期地面验证, 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%。

过去几年, SEBAL 在许多国家得到了推广应用, 包括美国、巴基斯坦、印度、斯里兰卡、巴西等。美国的 Idaho 水利部门在美国航天部门的支持下, 对 SEBAL 模型进行 2 次验证, 表明美国看到了 SEBAL 模型的价值, 认为 SEBAL 是新出现的技术, 有潜力成为水利部门广泛采用的水管理工具。

在此简要介绍 SEBAL 模型, 并对 SEBAL 中的时间外推方法进行说明, 以使用户在使用 SEBAL 时, 对基本情况有所了解并建立信心, 并能就遥感估算 ET 的应用进行分析。

一、SEBAL 模型简介

SEBAL 模型是用于计算大范围的陆面蒸发蒸腾 (ET) 的卫星遥感图像处理模型, 模型的基础是陆面能量平衡方程式:

$$Q^* = G_0 + H + \lambda E \quad (Wm^{-2}) \quad (1)$$

方程中 Q^* 是净辐射量; G_0 是土壤热通量; H 是感热通量; λE 是潜热通量。当辐射传向地面的时候, 认为 Q^* 是正的; 而当辐射远离地面的时候, 认为 Q^* 、 H 和 λE 是正的。方程 (1) 忽略了光合作用所需的能量以及植物储存的热量。在水文学、农学及气象学不同领域应用中感热通量 λE 对时间的积分非常重要。

SEBAL 模型有 25 个步骤, 通过计算陆面的感热通量和 ET , 进行陆面的辐射和能量平衡。SEBAL 利用美国陆地卫星和其它卫星的可见光、近红外和红外波段遥感数据, 逐像元地计算 ET 值^[1]。

SEBAL 的计算过程如图 1 所示。利用 DEM 和遥感数据进行辐射平衡, 计算其到达地表的净辐射和土壤热通量, 然后与气象因子一起, 通过能量平衡计算 ET 值^[2]。

通过利用半球形地表反射的反射系数和地表温度, 同时结合天顶角计算就能测得净辐射量, 这样就能计算短波辐射。利用土壤热通量与净辐射比的经验值, 能够求出土壤热通量。用地表反照率和地表温度之间关系曲线的斜率来计算有效面积动量通量, 而不是利用地面上测量的风的垂直廓线或用地面风速来计算。通过感热通量传输方程的逆运算, 计算

地表温度和空气温度之间的温度梯度，并与遥感的辐射地表温度呈线性相关，即假定湿像元的 $H = 0$ 和干像元的 $\lambda E = 0$ 。这样就不需要单独的大气温度观察资料，并且确保了热量传输的表面粗糙度、温度梯度和各种通量之间正确的物理耦合关系。利用莫宁-奥勃霍夫相似假设可得到感热通量公式。潜热通量是陆面能量平衡方程的差值。表 1 概括了 SEBAL 模型的优缺点^[1]。

表 1 SEBAL 模型的优缺点^[1]

优 点	缺 点
需要收集的数据量少	仅适用于没有云的情况
物理概念明确，适用于各种气候条件	必须有干陆地和湿陆地基础材料
不需要进行土地利用分类	不能很好地描述地表粗糙度
不需要水文数据	
如果使用高分辨率的数据，就能得到水文气象参数的半方差和概率密度函数	
该方法适用于所有可见光辐射、近红外辐射和热红外辐射，这表明它能用于不同的空间和时间尺度上（但不意味着对所有尺度和分辨率的组合都能保证有很高的准确率）	
对于高分辨率图像，能够用实际测量的通量和土壤湿度进行结果验证	
模块化方法	

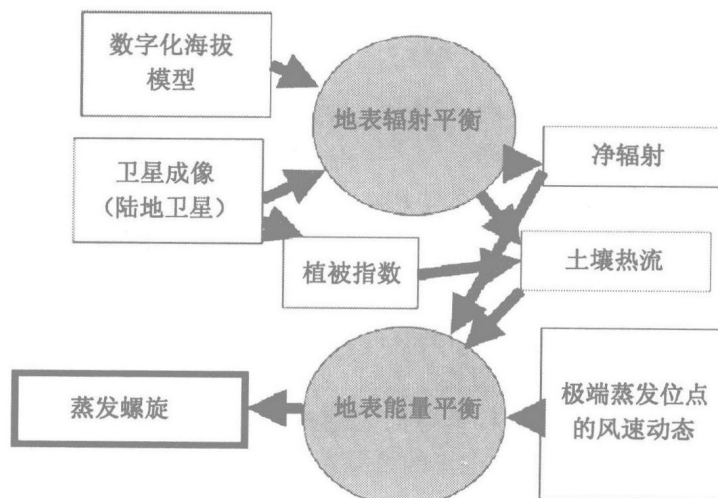


图 1 SEBAL 模型的处理流程

二、SEBAL 中的时间外推法^[2]

利用遥感数据估算 ET 值时遇到的难题是卫星所测得的地面数据是瞬时的, 也就是卫星过境瞬时所拍摄的地面信息, 而 ET 值应是一段时间的蒸发蒸腾水量, 如一日的蒸发蒸腾量, 一周的蒸发蒸腾量等。利用瞬间的卫星数据来估算一段时间的 ET 值, 就出现了时段不一致的问题, 也即如何将卫星瞬间测得的 ET 值外推至一日或一周, 并能有相当的精度。

SEBAL 模型取得成功的关键在于假定卫星过境时的作物系数 K_c 和 24 小时的 K_c 值相等。作物系数 K_c 则是 SEBAL 模型计算得到的 ET 值与参考 ET 值的比值:

$$K_c = ET_{SEBAL} / ET_r$$

式中 ET_r 是在不缺水条件下、植被完全覆盖的 ET 值。美国验证表明, 在卫星过境时的 K_c 值与日平均 K_c 值相等 (图 2、图 3)。而 ET_r 的使用考虑了风速和水汽压的日变化影响, 而一日内的风速和湿度的变化会改变 $Q^* - G_o$ 在 ET 和 H 中的分配。

ET_r 的计算采用标准的 Penman-Monteith 方程计算。

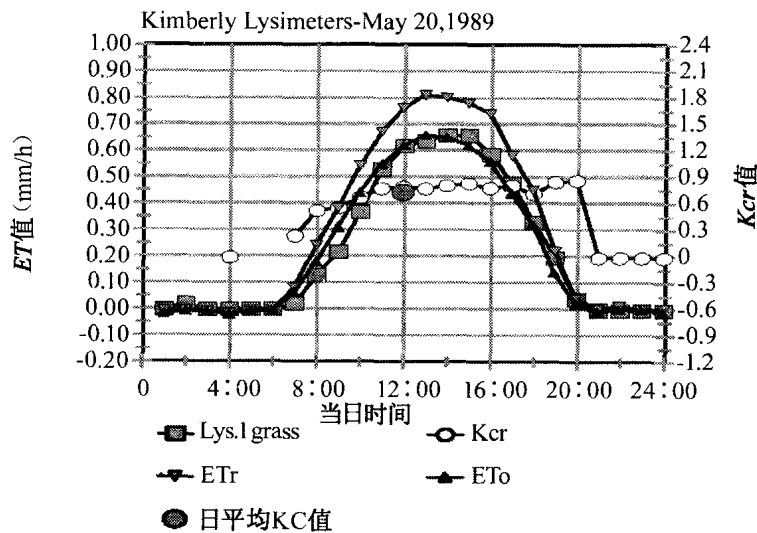


图 2 SEBAL 模型作物生长期实测 K_c 值

用遥感估算得到的每天的 ET 值估算整个作物生长期的 ET 值时, SEBAL 模型简单地利用遥感过境日估算的 K_c 值作为所代表的周或旬的每日平均 K_c 值 (图 3)。结果表明, 用周作为计算单元时, 在 5~9 月, SEBAL 模型结果与实测结果的标准差是 13%。比较而言, 利用气候数据计算每日的 ET 值可以得到 10% 的精度, SEBAL 模型可以得到相类似的精度, 但一次能得到 3 000 万个像元的值。

验证表明, 遥感估算一日的 ET 值的误差相对较大, 但用作每周或旬的平均值, 并对整个作物生长期累加时, 误差少于 1%, 说明每日的误差是随机的, 累加时误差被相互抵消了 (图 3)。

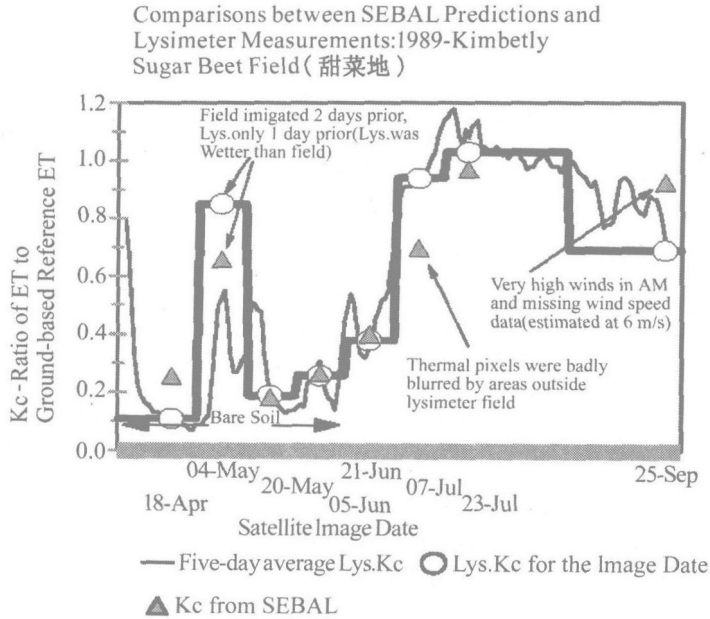


图3 SEBAL 模型实测甜菜地 K_c 值

三、ET 的应用^{[3][4]}

遥感可以提供何种类型的信息? 遥感可向决策者、管理者、咨询者、研究人员和大众提供与水资源相关的重要信息, 如 ET 。这种信息在立法、计划编制、水分配、评估、影响评价、调查研究以及在健康和环境相关领域都有潜在的用处。

遥感信息的优点。首先, 来自遥感的测量是客观的, 而不是主观的。第二, 遥感以系统化的方式搜集信息, 并能形成长时间序列的信息, 并能用作相互比较。第三, 遥感可覆盖大区域, 如整个流域的面积, 而地面测量则常常由于昂贵的费用和后勤供给条件的约束被限制在狭小的实验区内。第四, 遥感所获得的信息能按行政单元、流域单元汇总, 也能被细分成比例适度仍具空间特性的更详细的信息。第五, 这些信息能通过地理信息系统进行空间描述和表达。

基于遥感的 ET 值估算, 与其它信息相结合, 可应用于诸多方面。下面仅就主要的方面予以简要说明。

1. 水利用模式和生产力

随着对水资源利用严重性的日益加剧, 理解水利用模式是非常重要的。水资源何时以及怎样被消耗? 水资源节约挽救的时机在哪里, 以及水利用效率如何提高? 如何使得水资源以一种既定的体系来进行最优再分配, 并使得这种体系的生产率得到最大发挥? 水利用研究过去常常注重于流域水利用中的各个用户, 以及各用户的利用效率。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、农田和蔬菜作物的蒸发量等, 进而评估各土地类型的 ET 值和水的利用模式。把遥感估算的 ET 值和作物产量结合起来, 可得到水的生产力变化。

2. 灌溉系统的性能诊断

理想的灌溉管理系统, 在其管理技术中应当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, 是一个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, 可对其变化的差异作出解释, 从而发现在生产力方面的差异的原因, 进而分析灌溉的效果。

用同一卫星数据估算的 ET 值可用于比较不同灌溉系统的性能, 分析不同气候、地区的作物密度、 ET 值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等状况。所有这些分析均采用相同的能量平衡方法, 使用 30m 分辨率的 TM 数据来分析, 这样可确保取样、测量和解译技术相近, 有利于比较。

3. 规划和水权

随着水资源压力的日益增加, 水利用模式也处在不断变化之中。关键是要重新思考并制定长期的规划, 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。

水利用规划要求有准确的灌溉面积、作物模式、 ET 值和水利用的历史数据信息。而来自地表的信息常常是以设计数据而不是实际数据为依据。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, 有的高达 40% 到 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, 因而实际状况与规划情形完全不同。这里, 遥感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, 它是关键因素。建立水权体系的 2 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的情况, 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实施来完成。

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、及其面积来确定的, 项目实施情况通过遥感则可一目了然。在一些缺水地区, 则禁止某些作物种植和地下水的使用, 只允许农民使用有限数量的地下水, 以保护地下蓄水层资源。

4. 运行管理

效果评价是高效灌溉管理的基本内容。来自田间信息的定期反馈可充分提高水利用的效率。然而, 获取有关实际田间状况的客观评价是困难的。现在, 可在一定条件下遥感并提供了解决问题的可能性, 即对 100ha 大小的单元区域进行重复监测。这样, 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不断的修正。对于那些只负责供水的灌溉系统, 这样的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, 从而诊断分析偏

离的原因,并相应地调整供水方案。

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,而在确定实际提供的服务是否符合规定要求方面扮演重要角色。灌溉系统的水分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的。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的。遥感则能定期地更新灌溉区域,从而减少与灌溉区域的原先估计值的偏差。种植模式也可能由于市场机制、水涝或者是水缺乏而改变。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。

5. 影响评价

以不同方式投入到排水灌溉建设中巨额资金,促进了灌溉的发展,但哪些设计工作应该继续或完善呢?哪些应停止?要取得成功依靠什么?这些问题常常得不到充分回答,因为缺乏实地信息以及长时间状况变化的信息。在这方面,遥感则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时期的 *ET* 值,并探究这些变化。

工程影响评价要求将灌溉状况以前和工程执行以后的情形进行比较。为此在灌溉工程交付使用后,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、单位水的生产力的变化、灌溉面积的变化、作物种植结构的变化等,从而对工程投资效果进行分析。

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。而水需求状况可能超过水的供给。世界许多流域,甚至是湿润气候条件下的河流,面临水短缺的状况。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是不充分的。环境系统是指所有的自然植被系统(即非人类种植的植被),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* 值估算,不仅对农耕地,也包括流域内所有地区,为获取此信息提供了可能,并能迅速对流域水状况作出评价,从而服务于决策。

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其他用户。上游的开发如森林采伐、灌溉现代化、不断扩展的城市化和工业化发展,将影响下游沿河地区。那些初看无害于生态但实际上是违背环境规律的人类活动,很可能已对其它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行动,很可能导致沿海地带区域的动植物灭绝。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,并对其它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。

因此,水管理必须拓宽思路,寻求量化解决途径,以求流域水利用的和谐。在流域背景下,对土地利用、水利用和水供给之间的关系,必须进行定量描述,这是开展流域水平衡的基础,而遥感估算的 *ET* 值为这一定量描述提供了依据。

本文通过文献综述,简要介绍了 SEBAL 模型和优缺点,以及在时间外延中采用的方法和依据。SEBAL 模型是一个卫星影像处理模型,由 25 个计算陆地能量平衡的子模型组成。

SEBAL 最初的应用试验表明: 它可作为一种有效的、精确的和相对低廉的方法程序来估算实际的 ET 值, 包括灌溉用地上的农作物 ET , 自然系统的 ET 等。来自卫星影像的 ET 可以替代当前水利部门使用的传统的现场测量方法, 精度在同一量级上, 但遥感提供的信息却要多的多, 一次提供几千万个像元的 ET 值。

用 SEBAL 模型得到日、周、旬、月、季、年 ET 图可以表示长时间系列的 ET 及其空间分布, 为水资源规划、管理、评价、评估提供了精确的数据基础。

参 考 文 献

- [1] Bastiaanssen, W. G. M., H. Pelgrum, J. Wang, Y. Ma, J. F. Moreno, G. J. Roerink and T. van der Wal, 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL), part 1: formulation, part 2: validation, *J. of Hydr.* 212 ~ 213: 213 ~ 229
- [2] Morse, A. M., et. al., 2002 Application of the SEBAL Methodology for Estimating Evapotranspiration and Consumptive Use of Water Through Remote Sensing, *Final Report, Idaho Department of Resources*.
- [3] Bastiaanssen, W. G. M., et. al 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications, *Agricultural Water Management*, 46: 137 ~ 155
- [4] Bastiaanssen, W. G. M., et. al 2002. Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use, *Agricultural Water Management*, 1779: 1 ~ 22

流域尺度 ET （蒸发蒸腾量）的遥感反演

王介民^{1,2}

(¹ 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所
北京师范大学资源环境学院)

利用多光谱卫星遥感可以反演水文气象模式所需的一些基本地面参数，进而得到整个流域尺度上的蒸发蒸腾量（ ET ）的分布图像，对流域水资源的管理提供重要依据。为此介绍有关遥感方法的发展，并着重对近年来国际上应用较好的“陆面能量平衡方法（SEBAL）”作介绍。遥感监测 ET 涉及一些物理过程，其结果的验证和改进，更需要了解当前地面观测计算 ET 采用的一些较新的技术。本文第二部分对此作了简述。

一、引言

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，地表不同下垫面向大气的水分散发（包括土壤蒸发和植物蒸腾两方面，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最重要的分量之一。在当前水资源严重短缺的情况下， ET 的监测和总量控制对流域的水资源管理、区域规划和可持续发展研究尤为重要。

近 30 年来，随着技术的发展， ET 的估算和监测已有重大进展。20 世纪 50~60 年代发展的彭曼-蒙蒂斯（Penman-Monteith）方法，由于对不同作物不同气象条件下蒸发蒸腾量的扩展研究和世界粮农组织（FAO）的推荐，已经更加成熟。大气近地层观测技术与地气间能量和物质（包括水分、 CO_2 ）交换研究，在 20 世纪 80 年代以来在全球大规模发展，使原来研究等级的大气近地层通量-梯度关系方法（包括空气动力学方法，波文比法），涡旋相关方法，以及测量土壤含水量的 TDR 方法等，也逐渐在一些地区推广到业务化的应用，从而使 ET 的观测计算更加准确。

然而，这些观测和计算都是在一些地面站点进行的，其结果通常只能代表一个很小的区域；时间上的代表性也常常受人力、物力的很大局限。遥感，特别是多波段卫星遥感技术的发展，使获取一个流域尺度上地表多种重要参数分布的完整信息成为可能。监测整个流域的蒸发蒸腾量是一个全新的事物。人们在 20 世纪 90 年代初首次利用卫星遥感反演得到一个流域上的 ET 分布图像时，心情的振奋是难以言喻的。当前的遥感技术并不直接测量 ET ，它在 ET 计算中的巨大潜力表现在以下两方面：

(1) 空间遥感可观测一个区域，具有时空的连续性和大跨度。地面站点的观测结果则可通过卫星遥感扩展到整个流域，特别是在站点稀少的地区。

(2) 利用多光谱遥感可以测量或反演水文气象模式中所需的一些基本地面参数，为估算 ET 的通用方法的更好应用，或发展全新的计算 ET 方法提供了基础。

利用卫星遥感资料反演区域 ET ，近 20 多年来逐步发展，已经有几种较为成熟的方法。有的相对较简单，如只由多波段遥感资料计算地表可利用辐射能分布，进而利用传统的

Priestley-Taylor 公式或互补相关模型等推算蒸发蒸腾量。有的则较为复杂, 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 资料等, 结果相对较精确。其中荷兰 DLO Staring Center 为主体发展的“陆面能量平衡方法”(Surface Energy Balance Algorithm for Land, SEBAL)^{[1],[2]}, 物理基础较为坚实, 近年来在国际上, 包括在欧美和亚非一些国家, 有许多成功应用的例证^{[3],[4],[5]}。

由于资料和技术推广等问题, 遥感估算 ET 在水资源管理上的实际应用至今仍较少。但在一些研究领域, 如全球气候模式(GCM)的陆面过程参数化、植被覆盖与产量、积雪水文和土壤湿度的反演等方面, 卫星遥感的应用已有巨大进展。

二、ET 的地面观测与估算

在介绍遥感反演 ET 的有关方法之前, 先要对较先进的地面观测与估算 ET 的方法有所了解。这些方法中, 有的涉及遥感反演 ET 所需的一些基本原理, 有的则是检验和改进遥感计算 ET 的方法所不可缺少的。

1. 地表能量平衡原理和水分平衡原理

地面观测与估算蒸发蒸腾量常常依据地表能量平衡原理或土壤水分平衡原理。蒸发蒸腾过程, 受地表能量交换制约, 并受最大可利用能量的限制。因此, ET 可以通过地表能量守恒原理计算:

$$R_n - G = H + \lambda \cdot ET \quad (1)$$

其中 R_n 为净辐射, G 为地表向下的土壤热通量。($R_n - G$) 为地表可利用能量。 H 为感热通量, λET 为潜热通量 (λ 为水的蒸发潜热)。各量的单位为 (Wm^{-2})。 R_n 和 G 可直接测量或由气候参数估算 (下详)。

水分平衡方程一般可表示为:

$$P = R + D + ET + \Delta S \quad (2)$$

其中 P 为降水, R 为径流, D 为深层排水, ΔS 为土壤贮水。在没有降水和径流并忽略深层排水及土壤毛细提升的短时段内, 蒸发蒸腾量等于土壤含水量的减少。

2. FAO Penman-Monteith 方法

这是由世界粮农组织推荐的一种计算 ET 的综合方法。首先用 Penman-Monteith 公式

$$\lambda \cdot ET_r = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p(e_s - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_{sa})} \quad (3)$$

计算指定作物(短草或苜蓿)在水分充分供应下的参考蒸发蒸腾量 ET_r , 再由实验确定的不同系数, 计算不同作物在水分充分供应下的 ET_c 以及实际气候与土壤条件下的 ET_a 。(3) 式中的 Δ 为饱和水气压随气温变化的斜率, ρ 和 C_p 分别为空气密度和定压比热, $(e_s - e_a)$ 为空气的饱和压差, γ 为湿度计常数, r_a 和 r_s 分别为总体的空气动力学阻尼和冠层(叶面气孔)阻尼。 ET_r 其实表示与作物和土壤状况无关的一种大气蒸发力, 可用气候或气象资料推算。FAO Penman-monteith 方法提供了计算 ET_r 日总量 (mm/d) 的简单公式, 以及计算不同

作物 ET_a 的实验参数。

由于空气动力学阻尼和表面（气孔）阻尼等难以确定，传统应用中还有许多简化。如 Priestley-Taylor 公式等。

3. 大气近地层通量 - 梯度关系方法

在距地表数十米的大气近地层中，如果下垫面较为平坦均匀，并有 2 层或多层的风、温、湿梯度观测，则根据近地层相似理论，以下关系较好地成立：

$$u(z_2) - u(z_1) = \frac{u_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_m\left(\frac{z_2}{L}\right) + \Psi_m\left(\frac{z_1}{L}\right) \right] \quad (4)$$

$$\vartheta_v(z_2) - \vartheta_v(z_1) = \frac{\theta_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_h\left(\frac{z_2}{L}\right) + \Psi_h\left(\frac{z_1}{L}\right) \right] \quad (5)$$

$$q(z_2) - q(z_1) = \frac{q_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_h\left(\frac{z_2}{L}\right) + \Psi_h\left(\frac{z_1}{L}\right) \right] \quad (6)$$

式中 z_2 和 z_1 分别为上下 2 个观测高度； u ， θ_v 和 q 分别为观测所得风速、虚位温 [$\theta_v \cong (1 + 0.61q) \cdot T \cdot (1000/P)^{0.29}$ ，其中 T 为温度 (K)， P 为气压 (hPa)]， q 为比湿； $k = 0.41$ ； Ψ_m 和 Ψ_h 分别为对于动量输送和热量、水汽输送的大气稳定度函数（中性稳定下为零，不稳定和稳定情况下的具体表式从略）； u_* ， θ_* 和 q_* 分别为近地层摩擦速度、温度尺度参数和湿度尺度参数，在测得各层风速、温度、湿度及大气稳定度条件下，摩擦速度 u_* 可由 (4) 式计算，感热通量 H 和蒸散量 ET 可由下二式求得：

$$H = -\rho C_p u_* \theta_* \quad (7)$$

$$ET = -\rho u_* q_* \quad (8)$$

只要风、温、湿梯度有足够的测量精度，由以上通量 - 梯度关系可以比较精确地计算 ET 。另外，可将感热通量表示为经典关系式：

$$H = \rho C_p \frac{T(z_2) - T(z_1)}{r_a} \quad (9)$$

则空气动力学阻尼 r_a （参 (3) 式）亦可由 (4) 式求得：

$$r_a = \frac{\ln(z_2/z_1) - \Psi_h(z_2/L) + \Psi_h(z_1/L)}{ku_*} \quad (10)$$

以上诸式在遥感反演 ET 的 SEBAL 方法中都会用到。此外，过去常说的空气动力学方法，是根据风、温、湿梯度资料及相应的“湍流扩散系数”来求各有关通量。利用以上 (4) ~ (8) 式，亦可分别导出动量、热量和水汽的湍流扩散系数的表达式。

在有温湿梯度观测资料时，可用下式计算波文比（Bowen Ratio）：

$$\beta = \frac{H}{\lambda \cdot ET} = \frac{C_p \theta(z_1) - \theta(z_2)}{\lambda [q(z_1) - q(z_2)]} \quad (11)$$

再结合能量平衡方程式 (1)，在波文比已知时，即可由下式求 ET ：

$$\lambda \cdot ET = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (12)$$

这就是常用的波文比方法。

4. 涡旋相关 (Eddy-correlation) 方法

如果有垂直风速、温度和空气湿度的快速准确观测, 每秒钟采样 10 次或更高, 连续采样 15min 到 1h, 以覆盖对近地层通量输送有贡献的主要湍涡, 则可由采样所得风、温、湿脉动资料计算相应脉动量的协方差, 进而由以下各式直接计算各湍流通量:

$$u_*^2 = -\overline{u'w'} \quad (13)$$

$$H = \rho C_p \overline{w'T'} \quad (14)$$

$$ET = \rho \overline{w'q'} \quad (15)$$

其中 w' , T' 和 q' 分别为垂直风速、温度和比湿的脉动值。这种方法, 理论基础坚实可靠, 不需要太多的假设和经验参数, 是一种直接测量通量的好方法, 其结果常常用作其它方法包括遥感监测 ET 的检验标准。风速和温度脉动的测量, 常用超声风速温度仪和细线热电偶快速温度传感器等测量, 湿度的脉动则可用快速红外湿度仪等测量 (有的可同时测量 CO₂ 脉动并计算 CO₂ 的垂直通量)。这些仪器, 以及数据采集和处理设备等, 价格较高, 使用也需要一定的专业知识和维护技术, 故而过去数十年里主要在研究部门的某些特定的加强观测期使用。但是随着测量和计算技术的飞跃发展, 涡旋相关方法已逐渐转向业务化的常规使用。如我们正在开展的青藏高原陆面过程实验研究中, 已有多台涡旋相关方法的测量设备同时运转, 可以无人维护自动采集常年连续工作。

5. 地面站点观测的时空代表性

以上各通量包括 ET 的地面观测与计算, 按大气近地层理论分析和实际检验, 其时间分辨率一般可达 1h, 日总量可由各小时的结果累积求得。各观测站点的空间代表性, 则因下垫面的复杂程度而异。对平坦均匀下垫面, 一个站点的近地层观测, 其代表性可以达到 1km ~ 10km 左右; 而对常见的复杂下垫面, 如地形起伏, 林网地带, 不同作物间作并与裸地交混等情况, 一个站点观测的代表性就可能只有几百米或更小。众所周知, ET 的时空变化非常大。这样, 如果一个流域的尺度为 10²km 到 10³km, 则仅由地面站点观测来估算整个流域在一定时段之内的 ET 值, 其难度之大是可想而知的。利用卫星遥感资料进行反演, 则可解决这一难题。

三、多波段卫星遥感监测 ET 的发展

卫星遥感技术在近 20 年来有极大的发展。特别是 20 世纪 90 年代“地球观测系统 (EOS)”计划实施以来, 一系列最新的 EOS 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, 都远非过去一些遥感卫星可比。与此相应, 理论和资料应用包括 ET 的监测方法研究, 也有了很大的进展。

当前, 利用卫星观测计算 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反演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反演地表温度和比辐射率。地表反照率是控制地表可利用辐射能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。植被指数则反映了地表植被覆盖状况, 后者则直接影响地表反照率、粗糙度、比辐射率等其它参数。