

文章编号:1006-7639(2005)-02-0001-07

# ET 的遥感监测与流域尺度水资源管理

王介民<sup>1,2,4</sup>, 刘绍民<sup>2</sup>, 孙敏章<sup>3</sup>, 郭 锐<sup>4</sup>, W. Bastiaanssen<sup>5</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 3. 水利部中国灌溉排水发展中心, 北京 100038; 4. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020; 5. WaterWatch, Wageningen, The Netherlands)

摘要:在水资源短缺、水环境质量恶化的形势下,为实现流域的真实节水,需要以卫星遥感监测的 ET (蒸发蒸腾量) 为依据,进行流域水资源的有效管理。这是一个新的理念和方法。文中综述了当前国际上几种较先进的遥感监测 ET 的方法。其中“陆面能量平衡算法 (SEBAL)”,由于物理基础较好,近十多年来在许多国家有成功的业务化的应用,已被 GEF 海河流域水资源和水环境综合管理”项目采用,以计算从日到季和年,从每个县每种土地利用到全流域的 ET 分布。以 2002 年的预分析为例介绍了有关结果。讨论了 SEBAL 的不足之处及改善意见。

关键词:水资源管理; ET (蒸发蒸腾量); SEBAL; 海河流域

中图分类号: TP79

文献标识码: A

## 引言——水资源短缺与真实节水

水资源的短缺已是一个不争的事实。中国的水资源不足除人均水资源只占世界人均的 1/4 外,更表现在水资源分布不均,水环境质量恶化,特别是水管理效率低下等。供水不足已经造成了城市工业生产的巨大损失;干旱灾害的多发,除严重影响农业生产外,还引起了荒漠化等生态环境问题。如果不采取有效措施,有可能在未来引发严重的水危机。

以全国 7 大河流域之一的海河流域为例,这里是我国的政治、经济和文化的中心地区,国家主要的工业和粮食生产基地,人口占全国约 10%,而人均水资源却仅为全国的 1/7。近年来,由于过度的开发,地表的自然河道和湖泊已几近干涸,而且污染严重。海河向渤海的入流量已急剧减少,加之污染物过多,已造成海洋生态环境的严重退化\*。

图 1 给出 1998 年海河流域水平衡各成分的定量分配情况。流域的年降水量 (P) 为 1752.7 亿 m<sup>3</sup> (550 mm),黄河引水量 (T) 51 亿 m<sup>3</sup>,地下水超采量

(G) 55 亿 m<sup>3</sup>,入渤海量 (R) 42.8 亿 m<sup>3</sup>。

$$P+T+G=R+ET \quad (1)$$

由 1) 式可知年流域总蒸散量 (ET) 为 1815.9 亿 m<sup>3</sup>。需要注意的是,ET 超过降水量约 4% (63.2 亿 m<sup>3</sup>),主要是由超采地下水提供的\*。

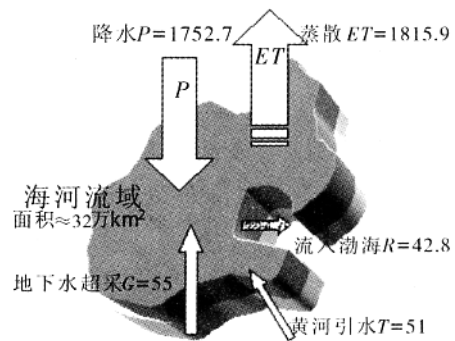


图 1 海河流域 1998 年水平衡各分量 单位:亿 m<sup>3</sup>

Fig. 1 Water balance components for Haihe River Basin, 1998. (Unit: 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)

这大概是近 20 a 的平均情况。较干旱年份如后面提到的 2002 年,年降水量只有平均年的

收稿日期:2005-04-26;改回日期:2005-04-29

基金项目《国家重点基础研究发展规划》地球表面时空多要素的定理遥感理论及应用 (G2000077908)项目资助

作者简介:王介民 (1937-),男,研究员,主要从事大气边界层物理,大气遥感和陆面过程研究。E-mail:jmwang@lzb.ac.cn

\*水利部海委 GEF 海河项目办公室. 海河流域水资源与水环境现状评价报告, GEF 海河流域水资源与水环境综合管理项目背景材料, 2003 年 2 月。

70%),地下水的超采就更严重。地下水连年超采,包括了华北平原的大部分地区,造成地下水位大幅下降,并引发了局部地区地面沉降和沿海地区地下水含水层受海水入侵等问题。

水资源,包括其数量和质量,都是十分有限的。而社会发展已经赋予它过重的承载。解决问题首要的还是“量水而行”,即从整个流域出发实现真实节水。其次,提高水的利用效率,对有限的水资源,提高其对发展和环境的承载能力。注意:“真实节水”和“提高水的利用效率”是两个概念。局部地区水利用效率的提高,如渠道衬砌和灌溉方法的改善等,对整个流域来说并不一定节水;渗漏的水可能在下游被重复利用,或用于环境植被。对像海河这样的流域来说,现在最关键的还是把整个流域的耗水量降下来,即实现真实节水。

## 1 新理念——基于遥感监测的 *ET* 进行流域水资源管理

在实现真实节水的同时提高水的利用效率,是水环境管理的目标。改变水资源管理效率低下的现状,还需要推进水权制度建设,明晰水权分配,并建立高效、协调的流域管理体制<sup>[1]</sup>。这些都需要首先对流域水的收支,在其空间分布和时间变化两方面,有科学的、定量的了解。

对海河流域,由以上的例子可见,水平衡各项中,降水和蒸散量(*ET*)分别占流域水“收入”和“消耗”的90%以上。对一个封闭的内陆河流域来说,降水和蒸散几乎就分别是全部的收入和消耗量。通过现有的大量气象水文站点,降水的时空定量分布已经能够较好地掌握。如能对*ET*的时空分布,对照不同地区的产值和作物生长季节变化,有精细的定量了解,则将大大有利于明晰水权分配,实施水资源的协调管理,并对真实节水的效果进行检验。

蒸发蒸腾量的常规观测已有数十年历史。然而众所周知,农业或水文气象站点的蒸发资料,其时空代表性的局限一直很大。采用水文方法(如式1)计算的*ET*值,又常是针对整个流域的年或季的结果,时空分辨率过于粗略,更远不能满足以上所述水资源管理的要求。近十多年来,随着卫星遥感技术和定量反演方法的迅猛发展,利用卫星遥感监测*ET*已成为可行的业务化方法。不同的卫星观测有不同的时空分辨率。如LANDSAT TM/ETM+的地面分辨

率为30 m(热红外为60/120 m),反演结果可用以分析较小地块的蒸发蒸腾量,并可用对应站点的涡旋相关方法或蒸散仪(Lysimeter)等的实际观测检验;但LANDSAT每16 d才过境一次,时间分辨率偏低。MODIS的地面分辨率有250 m、500 m和1 km等几种,但每天过境2次(包括Terra和Aqua两颗星),可用于从一个村镇到整个流域尺度的逐日蒸发蒸腾量分析。

“全球环境基金(GEF)海河流域水资源与水环境综合管理”项目(2004~2009)正是根据海河流域水管理的需要和遥感技术的最新发展,提出了一个理念——基于遥感监测的*ET*进行流域水资源管理。这是一个全新的理念,其核心就是演示和发展一种水管理方法,即对*ET*的监测和管理;通过减少无效或低效的*ET*,实现真实节水,使全流域在可持续发展的同时,在10~20 a内逐渐恢复到一个较合理的水平衡和好的生态环境。

## 2 遥感监测 *ET* 的方法综述

基于*ET*进行水管理的前提是可靠的定量的*ET*监测。近15 a来,利用各种卫星资料如LANDSAT TM,NOAA AVHRR,和EOS MODIS等,结合地面土地利用和常规气象资料等,已发展了多种遥感监测*ET*的方法。

### 2.1 改善的经验或统计模型

最简单的方法几乎完全依靠统计模型,即根据实际观测得到局地蒸散量与遥感参数包括地表温度和植被指数(*NDVI*)等的拟合关系,然后应用到全流域。这种方法显然难以应用于下垫面复杂的较大流域。改善的经验或统计模型,包含一定的物理过程,最常用的如下:

#### (1) 扩展的 Priestley-Taylor 方法<sup>[2]</sup>

常用的 Priestley-Taylor 计算蒸散量公式为

$$\lambda E = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G_0) \quad (2)$$

其中,*E*为蒸散量(*ET*), $\lambda$ 为蒸发潜热, $\Delta$ 为饱和水汽压随温度变化的斜率, $\gamma$ 为湿度计常数。系数 $\alpha$ ,按 Priestley-Taylor 等的研究,对较湿润下垫面可取常数1.26。改进的方法,根据遥感地表温度和植被指数的三角形空间分布对每个像元点分别确定 $\alpha$ 值,进而由(2)式计算*ET*。(2)式中 $R_n$ 和 $G_0$ 分别为地表净辐射和土壤热通量,可根据卫星遥感的地表反照

率和地表温度等方法计算(下详)。郭小寅根据这一方法,并由其它资料拟合了系数 $\alpha$ 同地表温度和植被指数( $NDVI$ )的关系,进而由 AVHRR 资料较成功地计算了甘肃黑河流域的  $ET$  分布<sup>[3]</sup>。

### (2) 互补相关模型

Bouchet 于 1963 年提出了陆面实际蒸散 ( $E_a$ ) 与可能蒸散 ( $E_p$ )、湿润环境蒸散 ( $E_w$ ) 之间的互补相关模型<sup>[4]</sup>:

$$E_p + E_a = 2E_w \quad (3)$$

刘绍民等利用互补相关模型并结合 NOAA AVHRR 的地表反照率较好地计算了 1981~2000 年黄河流域的逐月蒸散量<sup>[4]</sup>。

### (3) MOD16 算法

2002 年提出的 MODIS 蒸发产品 (MOD16)<sup>[5]</sup> 用 Penman 公式计算  $E_p$ , 用 Penman-Monteith 公式计算  $E_a$ , 用 Priestley-Taylor 公式 (取  $\alpha=1.26$ ) 计算  $E_w$ , 由之得到植被下垫面的蒸发比  $EF_{veg}$ ,

$$EF_{veg} = \frac{\lambda E_{veg}}{R_n - G_0} = \frac{\alpha \Delta}{\Delta + \gamma(1 + 0.5r_s/r_a)} \quad (4)$$

式中  $E_{veg}$  即植被下垫面的蒸散量 (即前述  $E_a$ ),  $r_s$  为表面阻尼,  $r_a$  为近地面空气动力学阻尼, 其它符号与 (2) 式同。该 MOD16 算法将一个像元分为植被和裸土两部分, 如植被覆盖度为  $f_{veg}$ , 则该像元总蒸散量可写为

$$E = f_{veg} E_{veg} + (1 - f_{veg}) E_{bare} \quad (5)$$

MOD16 (2002) 算法以计算蒸发比为前提。蒸发比的定义及计算式如下:

$$EF = \frac{\lambda E}{Q} = f_{veg} \frac{Q_{veg}}{Q} EF_{veg} + (1 - f_{veg}) \frac{Q_{bare}}{Q} EF_{bare} \quad (6)$$

式中  $Q = R_n - G_0$ , 为像元下垫面可利用能量,  $Q_{veg}$  和  $Q_{bare}$  分别为植被和裸土的相应值, 都可以用辐射模型计算。 $EF_{bare}$  为裸土的蒸发比, 类似扩展的 Priestley-Taylor 方法中对  $\alpha$  的估算, 由植被指数—地表温度图得到。计算得到各像元的蒸发比  $EF$  后, 根据全天大部分时间  $EF$  约保持不变这一观测事实, 就可由卫星过境时刻计算的  $EF$  值, 得到日蒸散量。有关网站曾公布了利用 MOD16 (2002) 算法得到的美国本土的  $ET$  分布, 并与 AmeriFlux 有关结果作了比较。由于这一算法中的许多变量 (如阻尼  $r_s$  和  $r_a$ ) 的参数化方法过于简单, 进一步的应用报道很少。2004 年又有人向 NASA 推荐试用 SEBS 算法 (下详) 做 MODIS 的蒸发量 MOD16 产品<sup>[5]</sup>。

## 2.2 基于近地面能量平衡的算法

这是当前应用最为广泛的遥感监测  $ET$  方法, 其基本依据是近地面能量平衡方程:

$$R_n - G_0 = H + \lambda E \quad (7)$$

$H$  为感热通量。如在求得近地面可利用能量 ( $R_n - G_0$ ) 后又能用某种方法求得  $H$ , 则潜热通量  $\lambda E$  或蒸散量  $E$  (即  $ET$ ) 即可用余项法得到。以下着重介绍国际上最常用的 SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) 和 SEBS (Surface Energy Balance System) 两种方法。二者其实最初是从荷兰的同一个研究所发展的, 但计算  $H$  的过程有所不同。

### (1) SEBAL (陆面能量平衡算法)

这个算法是 1993 年起逐步发展的<sup>[6]</sup>, 我们在 1994 年首次将其成功应用到黑河实验区<sup>[7-8]</sup>, 此后又有几次改进。最新的 SEBAL 算法, 首先根据由遥感得到的地表反照率 ( $\alpha$ ) 和地表温度 ( $T_0$ ) 由下式计算各像元的净辐射,

$$R_n = (1 - \alpha) R_{s\downarrow} + \varepsilon_0 R_{L\downarrow} - \varepsilon_0 \sigma T_0^4 \quad (8)$$

式中  $R_{s\downarrow}$  为向下的太阳短波辐射,  $R_{L\downarrow}$  为向下的大气长波辐射,  $\varepsilon_0$  为地面比辐射率,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数。计算中考虑了简单的大气订正, 并采用了遥感植被指数与地面比辐射率的经验关系。其次, 地表土壤热通量  $G_0$  由其与  $R_n$  及植被指数等的经验关系计算, 从而得到近地面可利用能量。

感热通量根据单源模式用梯度法计算:

$$H = \rho C_p \frac{T_0 - T_a}{r_a} \quad (9)$$

式中  $T_a$  为近地层空气温度,  $\rho$  和  $C_p$  分别为空气的密度和定压比热,  $r_a$  为前述的空气动力学阻尼。SEBAL 利用了如下的近地层大气 Monin-Obukhov 相似理论关系式 (注意, 为简单计将位温用温度代替):

$$u = \frac{u_*}{k} \left[ \ln\left(\frac{z-d}{z_{0m}}\right) - \Psi_m\left(\frac{z-d}{L}\right) + \Psi_m\left(\frac{z_{0m}}{L}\right) \right] \quad (10)$$

$$T_0 - T_a = \frac{H}{ku_* \rho C_p} \left[ \ln\left(\frac{z-d}{z_{0h}}\right) - \Psi_h\left(\frac{z-d}{L}\right) + \Psi_h\left(\frac{z_{0h}}{L}\right) \right] \quad (11)$$

$$r_a = \frac{1}{ku_*} \left[ \ln\left(\frac{z-d}{z_{0h}}\right) - \Psi_h\left(\frac{z-d}{L}\right) + \Psi_h\left(\frac{z_{0h}}{L}\right) \right] \quad (12)$$

各式所用皆为通用符号:  $u_*$  为摩擦速度,  $k$  为卡曼常数,  $d$  为位移高度,  $z_{0m}$  和  $z_{0h}$  分别为动量和热量输送粗糙度,  $L$  为 Obukhov 长度,  $\Psi_m$  和  $\Psi_h$  分别为积分的动量和热量稳定度函数 (表达式略)。

注意, 这里的主要困难是近地面的空气温度 ( $T_a$ ) 和风速 ( $u$ ) 值难以由遥感得到。SEBAL 的创意主

要是在图像分析范围内确定“干(热)”、“湿(冷)”2个锚点。对干(热)点,如沙地裸土等像元,蒸发量很小,初步设定感热  $H \approx (R_n - G_0)$ ,进而求得近地层气温  $T_a$ 。对湿(冷)点,如浓密植被或水体像元,初步设定  $(\lambda E \approx (R_n - G_0))$ ,即  $H \approx 0$ ,或  $T_a = T_0$ 。然后,根据近地层气温与地表温度大致呈线性关系的假设(经过黑河实验等检验),推算各像元点的  $T_a$ 。其次,由(9)~(12)式可见,由于  $\Psi_m$  和  $\Psi_h$  等函数表达式的复杂性以及  $L$  是  $u^*$  和  $H$  等的隐函数,一般得不到  $H$  的解析解。SEBAL 根据地面台站的风速观测内插计算各像元在中性稳定度下的掺混高度(Blending height, 如 200 m)的风速,进而用循环迭代法由(9)~(12)式,及由“干”、“湿”2锚点计算  $T_a$  的方法,逐步逼近求得各点的感热通量  $H$ 。计算过程还涉及如粗糙度  $z_{om}$  和  $z_{oh}$  等一些参数的取值,都采用经验的参数化方法,还含有许多不确定性。

#### (2) SEBS 地表能量平衡系统<sup>[9]</sup>

SEBS 同样采用(8)式求得  $R_n$ ,但在计算地表比辐射率  $\varepsilon$ ,特别在用分窗法由 NOAA AVHRR 观测计算地表温度时采用了更新的研究结果。计算地表土壤热通量采用的参数化方法为:

$$G_0 = R_n [\Gamma_{veg} + (1 - f_{veg})(\Gamma_{bare} - \Gamma_{veg})] \quad (13)$$

其中  $f_{veg}$  为植被覆盖度,  $\Gamma_{veg}$  为密集植被冠层下土壤热通量与净辐射之比(取 0.05),  $\Gamma_{bare}$  为相应的裸土值(取 0.315)。SEBS 采用更细致的研究结果及专用子模式计算粗糙度参数  $z_{om}$  和  $z_{oh}$ ,并在计算(10)~(12)式时考虑了大气近地层和更高处大气边界层的稳定度函数的不同。SEBS 更突出的特点是利用中尺度数值天气预报模式 RAMCO 计算水平分辨率为 25 km×25 km 的边界层气象参数,包括边界层高度和气压、温度、湿度以及风场,由此计算感热通量,进而得到蒸发比(ET)。相对来说,有更好的物理基础。

由于遥感监测 ET 的目的当前主要是更好地管理水资源,因而在关注监测精度的同时,要求有关算法满足日常业务运行的需要。SEBAL 和 SEBS 在这方面各有优势和不足。近 10 多 a 来,SEBAL 已经在包括美国、欧洲、中国和南亚以及非洲一些国家广为应用,相对来说,更为适合水环境管理的实际需要。根据美国爱达荷大学利用 SEBAL 对熊河(Bear River)流域 ET 的计算,与蒸散仪(Lysimeter)结果相比,ET 的月平均误差为 ±16%,季平均误差仅为 4%<sup>[10]</sup>。我们在黑河中游的应用也得到了较满意的结果<sup>[11]</sup>。“GEF 海河流域水资源与水环境综合管理”项目

(2004~2009),已经把 SEBAL 确定为遥感监测 ET 的基本算法。

遥感监测 ET 究竟还是一项新技术。其中涉及许多物理过程,对有些过程的机理了解以及利用可测参数进行参数化计算的方法也并不十分成熟。往往是,为了计算一个参数却引入了另一个未知参数,后者的确定也许并不比前者更容易,或者在用户当前所处的条件下是如此。因此在选择模式或算法时必须对有关过程进行深入的了解。

以下给出 SEBAL 在海河流域的一个应用实例。

### 3 利用 SEBAL 对海河流域 2002 年蒸散量的初步分析

在“GEF 海河流域水资源与水环境综合管理”项目预研究阶段,作为初步分析,首先利用 SEBAL 对海河流域 2002 年全年的蒸散量作了计算。基础资料除每月 2 次的 1 km 分辨率的 MODIS 资料外,还需流域的 DEM(数字高程模型)、土地利用/土地覆盖以及尽量多的气象台站常规观测(实际上只取得 16 个站的数据)。卫星过境时刻的 ET 算得后,利用蒸散比外推到全天。每半个月的累积 ET,依据卫星

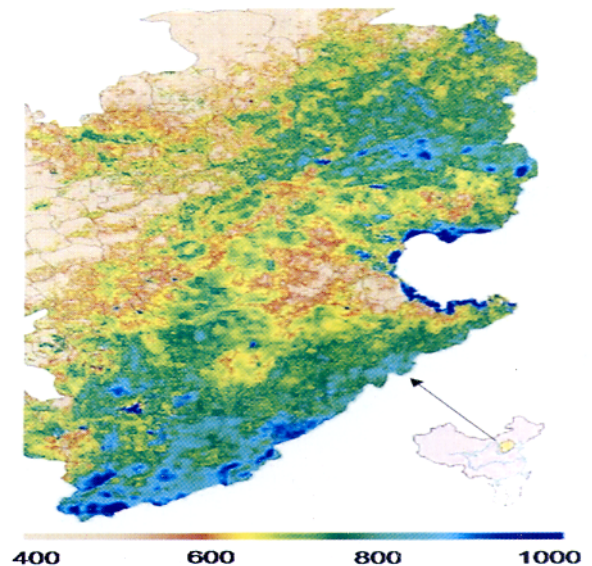


图2 海河流域 2002 年累积实际蒸散量分布 (mm) 由 MODIS 资料计算,地表分辨率 1 km。图中标出海河流域在中国的位置

Fig. 2 Annual actual evapotranspiration (mm) for 2002 interpreted from MODIS measurements in the Hai Basin. The spatial resolution is 1 km. The position of the river basin in China is also shown.

过境日求得的地表阻力参数值,利用世界粮农组织 (FAO) 推荐的 Penman- Monteith 公式计算;进而得到海河流域 2002 年全年的实际蒸散量,如图 2 所示。同样,可给出更为详细的流域各县或不同作物生长季节的 ET 分布。

由图可见,海河流域不同地区的年蒸散(耗水)量差别很大。靠近黄河左岸地区(ET 图的右下边缘),由于地表和地下的可利用水都较充裕,年蒸散量可达 800~900 mm。渤海沿岸地区的 ET 值也较高。但是,海河下游特别是天津西南部一带,年蒸散量却只有 400~500 mm,主要是地表水很少而地下水又含盐量偏高不利于农田灌溉的缘故。

这些结果显然还需要利用不同地区的实际地面观测进行检验。由于 MODIS ET 的地表分辨率为 1 km,而一个地面站点观测的代表性则受地表的非均匀性和来风方向 足迹( footprint) 的影响,二者在空间尺度上可能不匹配,所以比较和检验常常需要用到其它相关资料。实际上,2002 年尚没有针对性的地面独立验证观测;这里仅做一些简单的定量分析。图 3 给出 SEBAL 计算的河北栾城县和黄河左岸的 2002 年逐旬实际蒸散量的变化。SEBAL 也可用以估算生物量,有关结果同时画在图中。对栾城县,由图

可见当地明显的冬小麦—玉米两季生长结构。对冬小麦,整个生长期的累积蒸散量为 382 mm;对玉米,由于生长期较短,累积蒸散量为 281 mm。总的生物产量对小麦和玉米分别为 5 415 kg/hm<sup>2</sup> 和 5 824 kg/hm<sup>2</sup>。该县的年总蒸散量达 749 mm。对黄河左岸地区,由于水土资源都更好,生物产量和蒸散量都比栾城县系统性地偏高,两季节性的生长结构也更明显。

中国科学院栾城试验站的一些结果可用来作比较。Kendy 等给出<sup>[12]</sup>,2002 年该站降雨量为 460 mm,蒸散量为 660 mm (其中约有 200 mm 由过量抽取地下水提供)。Zhang 等指出<sup>[13]</sup>,当地冬小麦生长期的蒸散量在 250 mm(雨养农田)到 450 mm(250 mm 降水加 250 mm 灌溉,最大灌溉量约 400 mm)之间变化。这些数字同 SEBAL 的计算结果是可比的。

除去利用 MODIS 进行全流域的 ET 检测外,我们还利用分辨率为 30 m 的 LANDSAT ETM+ 观测对海河流域一些示范县进行了精细研究。图 4 给出北京北部几个县 2002 年 7 月 9 日的实际蒸散量分布。借助类似的高分辨率图像可以对不同土地利用和作物类型对 ET 的影响作仔细分析。

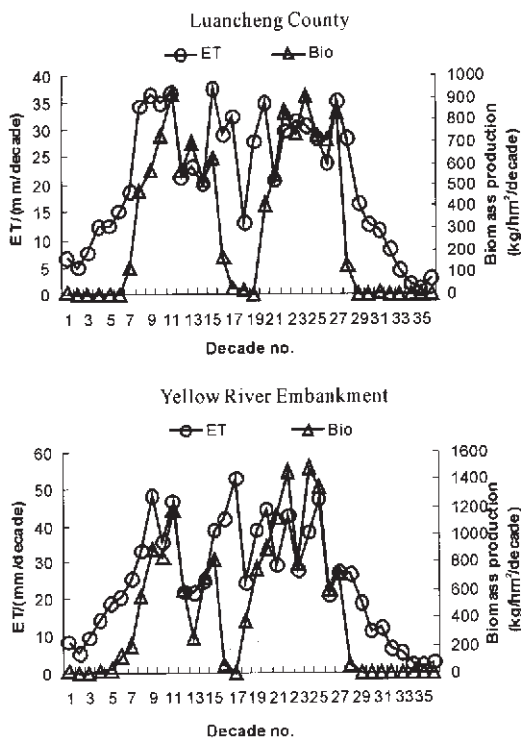


图 3 SEBAL 估算的河北栾城县 (上) 和黄河左岸 (下) 的逐旬实际蒸散量和生物量变化

Fig.3 Monthly variations of actual ET and biomass production of a 1 km×1 km pixel in Luancheng County (upper) and the Yellow River embankment (lower) respectively

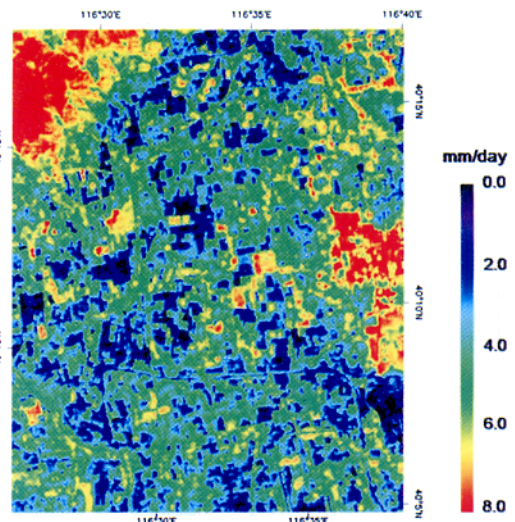


图 4 由 Landsat ETM+ 计算得到的北京北部地区 ET 分布, 2002 年 7 月 9 日

Fig.4 Example of actual ET in the north counties of Beijing on July 9, 2002, retrieved from high resolution Landsat ETM+

图 5 给出 2002 年海河流域各县的实际蒸散量超过降水量的数值大小分布。明显可见,有些县的当年实际蒸散量比降水量超出一倍左右,这大致就是有关县超采地下水的定量指示。2002 年是一个相对干旱的年份,降水较少,可能蒸散量较大,地面以

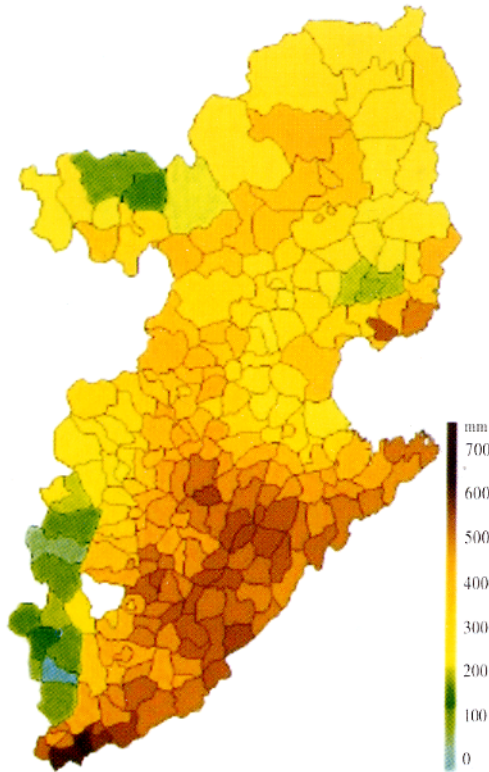


图5 2002年海河流域各县ET值超过降水量的定量分布  
Fig. 5 The distribution of the excess of annual actual evapotranspiration over precipitation for different counties in the Hai Basin, 2002

下非饱和带的土壤含水量也相对较低。海河流域多年平均降水量为550 mm,而2002年的全流域平均降水量仅为400 mm,对水环境造成更不利的影响。Kendy等指出<sup>[12]</sup>,华北平原的多年平均蒸散量约为660 mm/a。由表1可知,SEBAL计算的2002年流域平均ET为714 mm,比平常年份偏高;当年的流域水资源减少量可能达150~200 mm,相当于地下水水位下降1 m。表1还给出2002年其它水平衡分量的估计值,供参考。

表1 2002年海河全流域水平衡各项分配

Tab.1 Annual water balance of the entire Hai Basin in the dry year 2002

Term	Amount(mm)
降水 Precipitation	400
渗流 Seepage	50
灌溉 Irrigation(surface & groundwater)	214
蒸散量 ET	714
非饱和带土壤贮水 Storage change of unsaturated zone	-50

## 4 结论——独立验证与遥感ET方法的发展

遥感监测ET还是一项发展仅10多a的新技术。包括SEBAL在内,各种方法都还有许多局限。实际应用中,特别是GEF海河项目这样事关重大的业务应用中,必须对遥感监测的结果进行认真的检验,进而改善模式或其中的参数化方案,力求对具体细致的水资源和水环境管理的要求来说,ET定量监测的误差在允许范围之内。具体的误差要求可能随地区、水环境、时间段的长短等因素的不同而不同。

“GEF海河流域水资源和水环境综合管理”项目,设立了针对遥感监测ET结果的“地面独立验证”专题。除流域内常规气象水文站点的资料收集外,将在一些示范县建立辐射和湍流量观测站,包括4分量(向上向下的长波和短波)辐射和土壤热通量观测,自动气象站,涡旋相关法大气湍流量系统,特别是将引进数台大孔径闪烁仪(Large Aperture Scintillometer 简称LAS)。后者的工作距离为4.5 km,可以观测近地面数千米尺度上的感热通量并进而推算潜热通量,对MODIS的ET监测结果进行检验。通过独立验证站点各项资料的分析,不仅可以对遥感算法(如SEBAL)的ET产品作精度评判,也可对有关算法的具体计算步骤,特别是对主要模型变量的参数化方案(经验公式)提出更符合海河流域实际的改进意见。

以上提到,SEBAL是当前相对较好的遥感算法。基于TM和MODIS等卫星观测,结合常规地面资料,可以用之计算从具体一块农田到整个流域,从卫星过境时刻到一天、一个作物生长期以至全年的蒸发蒸腾量。然而,尽管SEBAL已经是现有遥感监测中一个较好的模式,它在计算感热通量过程中的一些处理仍然显得过于粗糙,如由“干(热)”、“湿(冷)”2个锚点外推各像元点的空气温度及对“掺混”高度风速的推算等。SEBS采用大气模式RAM-CO计算大气边界层高度的气象场,是一个好的尝试。最近我们试验用更通用的中尺度模式MM5,结合地面气象站观测和再分析资料,计算卫星过境时刻边界层以至近地面的风、温、湿场,进而与遥感监测ET的其它计算相结合。初步认为,作为业务化的应用是可行的。

基于遥感监测的ET进行流域水资源管理,就

是力求在可持续发展的前提下,把流域的 *ET* 降下来,实现真实节水。*ET* 的降低,与具体的土地利用和作物类型有关,也涉及诸多管理方面。这是一个全新的理念。

#### 参考文献:

- [1] 汪恕诚.搞好水资源管理促进可持续发展[N].人民日报,2002-03-22.
- [2] Jiang L, Ialam S. A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations [J]. Geophysical Research Letter,1999,26(17): 2773-2776.
- [3] 郭晓寅.黑河流域蒸散发的遥感估算[D].兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2002.
- [4] 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.
- [5] Nishida K, Nemani R R, Running S W J, et al. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation [J]. Journal of Geophysics Research,2003, 108(D9):4270.
- [6] Bastiaanssen W, Menenti M, Feddes R, et al. The surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 1 Formulation [J]. J of Hydr, 1998, 212-213, 198-212.
- [7] Wang Jieming, Ma Yaoming, Bastiaanssen W, et al. The scaling up of processes in the heterogeneous landscape of HEIFE with the aid of satellite remote sensing [J]. J Meteor Soc Japan, 1995, 73 (6): 1235-1244.
- [8] 马耀明,王介民.卫星遥感结合地面观测估算非均匀地表区域能量通量 [J].气象学报,1999, 57(2):181-189.
- [9] Su Z.The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes [J]. Hydrol Earth Syst Sci, 2002,6(1): 85-99.
- [10] Allen R, Morse A, Tasumi M. Application of SEBAL for Western US water rights regulation and planning. ICID Workshop on remote sensing of ET for large regions, Montpellier, France,2003.
- [11] Wang J, Bastiaanssen W, Ma Y, et al. Aggregation of land surface parameters in the oasis-desert systems of northwest China [J]. Hydr Processes, 1998, 12: 2133-2147.
- [12] Kendy E, Molden D, Steenhuis T, et al. Policies drain the North China Plain, agricultural policy and groundwater depletion in Luancheng County, 1949-2000 [Z]. Research Report 71, International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, 2003,45.
- [13] Zhang H, Wang X, You M, et al. Water-yield relations and water-use efficiency of winter wheat in the North China Plain[J]. Irrig Sci, 1999,19: 37-45.

## Monitoring *ET* with Remote Sensing and the Management of Water Resources on a Basin Scale

WANG Jie-min<sup>1,2,4</sup>, LIU Shao-min<sup>2</sup>, SUN Min-zhang<sup>3</sup>, GUO Ni<sup>4</sup>, Wim BASTIAANSEN<sup>5</sup>

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. China Drainage Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 4. Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China; 5. WaterWatch, Wageningen, The Netherlands )

**Abstract:**The shortage of water resources is a serious problem particularly in China. Managing water resources on the basis of evapotranspiration (*ET*), retrieved mainly from satellite remote sensing, is a new concept introduced in the GEF Hai Project on comprehensive management of water resources and environment. The most popular remote sensing algorithms in the retrieval of *ET* are reviewed. Among them the SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) has better physical background and been used operationally in many countries in last 10 years. Data from the MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and Landsat TM/ ETM+ have been used to evaluate daily, seasonal and annual *ET* per county and per land use category. A preliminary analysis for the Hai Basin, for 2002, is presented. Further studies will be continued for the Hai River Basin over next five years, which will provide a reference for the application of basin scale water use technologies, in particular, the real saving of water resources by the reduction of *ET*. In the understanding of the limits of SEBAL, an independent validation program, including precise in situ flux observations, is to be operated in the Hai Basin Project. For demonstration periods, we have tried to use mesoscale atmospheric models, such as MM5, to get the meteorological fields near surface, and help SEBAL in its calculation of surface fluxes. The major task is the establishment of a real water saving program through an *ET* reduction strategy, with more water resources remaining in the basin for production and environmental use, including more freshwater discharges into the Bohai Sea. *ET* reduction is land use and crop type dependent. Other management factors also need to be included.

**Key words:** water resource management; *ET*; SEBAL; Haihe River basin