

利用 SEBAL 模型与 P-M 公式估算 乌裕尔河下游地表蒸散

曾丽红^{1,2}, 宋开山¹, 张 柏¹, 王宗明¹, 杜 嘉^{1,2}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 先通过 SEBAL 模型估算了乌裕尔河下游沼泽旱地交错区 1992 年 7 月 9 日、1994 年 7 月 15 日、1995 年 7 月 18 日、1999 年 7 月 13 日 4 个时相的日蒸散量, 并通过 P-M 公式与作物系数进行时间尺度扩展得到了这 4 个时相所处月份的蒸散量, 最后对日蒸散量、作物系数、月蒸散量的特征及其影响因素进行分析。结果表明: 日蒸散量的频率分布图呈双峰结构, 分别体现了旱地的蒸散特征、湿地与水体的蒸散特征; 平均日蒸散量依照 1994-07-15、1999-07-13、1995-07-18、1992-07-09 的顺序依次降低; 时相 1994-07-15 的平均日蒸散量与平均作物系数最高; 通过逐步回归分析发现日平均风速、日照时数、日最低气温对参考作物日蒸散量的影响较为明显。

关键词: 遥感; 蒸散; SEBAL; P-M 公式; 作物系数

中图分类号: TP79.426.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)05-0216-09

蒸散 (Evapotranspiration, ET) 是指水分从地表移向大气的过程, 它包括土壤与植株表面液相或固相水的蒸发和通过植物组织的蒸腾^[1]。在地气系统水循环中, 陆地蒸散量占全球降水量的 15%。占陆地降水量的 65%, 是地表水分的主要支出项^[2]。蒸散过程是土壤、植被、大气系统中水分运移、转化的重要环节, 对其研究具有重要的理论意义与实际意义^[3]。

Bastiaanssen 指出当前大部分遥感通量计算公式都不能满足具有复杂下垫面的流域和河流谷地, 其原因在于有限数量的观测无法反映水温、气象参数的空间分布^[4]。太阳辐射、空气温度、风速的局地测量制约着卫星过境时刻蒸散量的准确估计, 为此提出了基于地表能量平衡方程、具有较好物理基础、多步骤的 SEBAL 模型。SEBAL 模型最初是基于 TM 影像建立的区域蒸散量计算模型, 它利用地表温度、地表反射率和归一化植被指数, 以及它们之间的联系来估算不同地表覆盖上的蒸散量^[5,6]。Kite 等比较了通过水温、农田和遥感模型计算蒸散的优缺点, 指出了 SEBAL 模型具有较广泛的实用性^[7]。Hunk 通过三种遥感蒸散模型在土壤水分同化中的应用比较, 指出 SEBAL 模型比较适合 TM 影像^[8]。SEBAL 模型已经成功应用于西班牙、巴基斯坦、埃及、斯里兰卡、土耳其和中国等国家和地区^[9~11]。马耀明等

在黑河实验中利用 SEBAL 模型计算了非均匀地表的蒸散量^[12,13]。此外, SEBAL 模型还被应用在黄河三角洲和新疆南部干旱区等地区^[9]。众多实例证明, 利用 SEBAL 模型估算的地表日蒸散量与地面实测资料之间的误差较小, 能满足科学研究及实际应用的需求。

经过 FAO (联合国粮农组织) 1998 年罗马会议修正的 Penman-Monteith 公式 (以下简称 P-M 公式) 是一种重要的计算参考作物蒸散量的方法, 在气温、相对湿度、风速和太阳辐射资料可以获得或可以可靠地估算出来时推荐使用 P-M 公式来计算参考作物蒸散量^[1]。P-M 公式是具有坚实物理基础的计算参考作物蒸散量的方法, 能比较清楚地了解蒸散的变化过程及其影响机制, 其依据是能量平衡原理、水汽扩散原理及空气热导定律。P-M 公式与其它方法相比精度更高, 被 FAO 推荐为估算参考作物蒸散量的唯一方法, 已经得到了广泛应用^[14~19]; 这个方法很好证明, 并且在很多实验中已经通过了蒸渗仪实测数据的精度检验^[20]。

本研究以 SEBAL 模型与 P-M 公式为研究方法, 选择乌裕尔河下游的湿地、旱地交错区为研究区, 首先通过 SEBAL 模型结合气象数据估算日蒸散量; 其次利用气象数据与 P-M 公式计算参考作物日蒸散量并得到作物系数; 最后通过作物系数和月

收稿日期: 2009-03-26

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 (C08Y46); 国家自然科学基金项目 (40871187)

作者简介: 曾丽红 (1983-), 女, 湖南邵阳人, 博士研究生, 主要从事遥感蒸散研究。E-mail: lihonghello@163.com。

参考作物蒸散量得到了月实际蒸散量,并对其分布特点进行分析,以期为研究区的作物需水量研究、生态需水量研究、地物蒸散耗水特征分析及水资源管理提供参考。

1 研究区及数据源

1.1 研究区概况

选择乌裕尔河下游包括扎龙湿地及其附近面积广阔的旱地在内的矩形区域为研究区(研究区范围如图1虚线框所示)。研究区地跨黑龙江省的富裕、齐齐哈尔、泰来、杜尔伯特、大庆、林甸、依安等七个县(市、自治县),覆盖扎龙湿地和林甸县90%以上的面积。研究区1/3的区域为扎龙湿地,它位于松嫩平原左岸乌裕尔河下游的湖、沼、苇、草地带,总面

积约2 100 km²,是我国现存最大的以鹤类等大型水禽为主体的珍稀鸟类和湿地生态类型国家级自然保护区,它由许多小型浅水湖泊和广阔的草甸、草原组成,地表有不同程度的积水,形成了大面积的沼泽或沼泽化植被。在扎龙湿地的周围分布着大面积的旱地,是松嫩平原重要的粮食产区,主要种植玉米、大豆等粮食作物。研究区属于寒温带一温带大陆性季风气候,冬季寒冷漫长,春季干旱多风,夏季湿热多雨,秋季降温急聚,常有早霜发生,年平均气温2℃~4℃,多年平均降水量约430 mm,多集中在6~9月,多年平均蒸发量约1 300 mm(20 cm蒸发皿)。研究区在中国东北地区的位置及周围气象站点的分布见图1(底图为DEM数据)。

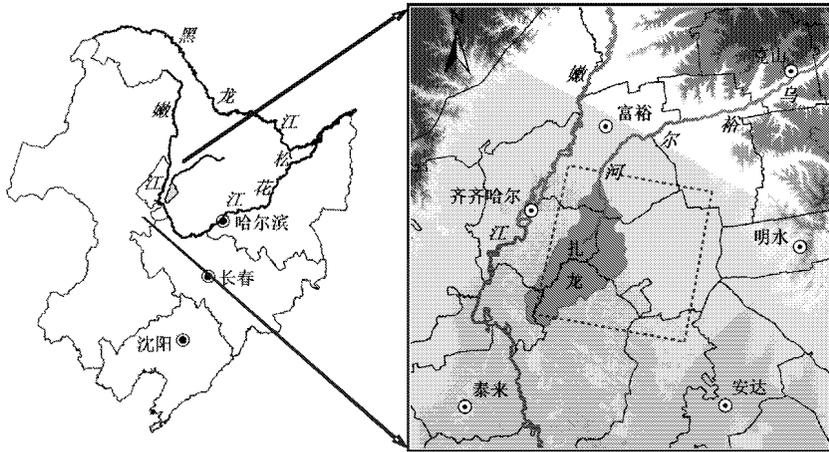


图1 研究区及其周围气象台站的位置

Fig. 1 Locations of the study area and its nearby meteorological stations

1.2 数据源及处理

1.2.1 遥感数据 选择4个时相的TM影像为数据源,遥感影像的详细信息见表1。由于缺少卫星过境时刻详细的大气参数,无法对遥感数据通过辐射传输模型进行大气校正,只能通过“暗目标相减法”进行相对简单而又有实际意义的辐射校正,选择深水作为暗目标,认为其在近红外波段的反射率为零。还需要对各时相的遥感影像进行空间配准,以1995年7月13日的TM影像为参考标准,将前后几个时相的影像与之配准,通过在ENVI 4.3中选取地面控制点进行几何精校正,保证同名像点的RMSE在0.3个像元以内,采用二次多项式进行灰度重采样。

WGS-84 51N 投影系统。

表1 遥感影像的详细信息

Table 1 Detailed information of remotely sensed images

时相 Phase (Y-m-d)	在太阳历中的 排序数 Sequence in solar calendar	过境时间 (GMT 时间) Duration	传感器 Sensor
1992-07-09	191	01:49:55	Landsat-5 TM
1994-07-15	196	01:45:00	Landsat-5 TM
1995-07-18	199	01:31:30	Landsat-5 TM
1999-07-13	194	02:04:30	Landsat-5 TM

1.2.2 DEM 将1:5万的地形图与遥感影像进行空间配准,通过手工半自动矢量化提取等高线,由等高线建立30m空间分辨率的DEM数据,最后将遥感影像与DEM转换为统一的空间坐标系,采用UTM

1.2.3 气象数据 气象数据来自从气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)下载的地面气候资料日值数据集。由于研究区内部没有设置国家基准站,为了获取覆盖研究区的网格状气象数据,需要利用周边6个站点的气象数据(气象站点的分布见图1)对日最高气温、日最低气温、日平均气温、日

平均风速、日平均相对湿度、日照时数等 6 项要素采用反距离权重法 (Inversed Distance Weighted) 结合 DEM 进行插值, 并以与遥感影像相匹配的空间分辨

率采样。这样就能将插值后的网格状数据输入到 SEBAL 模型与 P-M 公式中。

表 2 各站点不同时相的主要气象要素值

Table 2 Values of major meteorological factors for each station in different phases

项目 Items	1992-07-09						1994-07-15					
	克山	富裕	齐齐哈尔	明水	泰来	安达	克山	富裕	齐齐哈尔	明水	泰来	安达
日最高气温(°C) Max. temperature	29.1	30.5	30.2	29.2	28.9	30.0	29.6	31.4	31.2	29.4	31.2	19.3
日最低气温(°C) Min. temperature	13.4	13.5	13.9	13.5	14.2	13.8	16.5	17.6	20.0	17.7	19.1	16.7
日平均气温(°C) Mean temperature	22.9	23.2	22.7	22.6	23.1	23.2	24.2	25.6	25.0	24.2	25.7	23.7
日平均相对湿度(%) Relative humidity	50.0	54.0	57.0	51.0	54.0	51.0	62.0	62.0	71.0	66.0	68.0	70.0
日平均风速(m/s) Wind speed	1.5	1.3	2.0	2.5	2.0	2.3	1.8	1.8	1.3	1.5	2.0	1.8
日照时数(h) Sunshine hour	14.1	12.8	14.1	12.7	11.5	13.6	14.5	11.9	14.6	12.8	13.5	12.3
影像过境之前 20 天的总降水量(mm) Total precipitation in 20 days before image sensing	44.0	26.0	41.4	20.8	102.6	62.9	105.1	41.1	119.0	142.9	127.7	166.1

项目 Items	1995-07-18						1999-07-13					
	克山	富裕	齐齐哈尔	明水	泰来	安达	克山	富裕	齐齐哈尔	明水	泰来	安达
日最高气温(°C) Max. temperature	31.3	31.5	32.2	31.0	31.5	31.7	32.9	33.3	33.3	32.6	33.8	33.8
日最低气温(°C) Min. temperature	16.1	16.7	19.3	17.5	18.9	17.1	21.9	22.3	23.7	24.3	23.8	22.0
日平均气温(°C) Mean temperature	24.4	24.9	25.6	24.7	25.8	24.8	28.0	28.1	28.9	28.5	28.8	27.8
日平均相对湿度(%) Relative humidity	60.0	63.0	62.0	52.0	54.0	51.0	68.0	73.0	71.0	65.0	65.0	70.0
日平均风速(m/s) Wind speed	1.8	2.5	3.0	3.3	2.8	2.8	2.0	2.8	1.8	3.5	2.3	2.0
日照时数(h) Sunshine hour	14.1	12.6	14.3	13.9	13.4	13.4	13.7	10.6	12.5	13.3	13.0	12.6
影像过境之前 20 天的总降水量(mm) Total precipitation in 20 days before image sensing	25.0	34.9	47.2	45.1	33.0	38.2	107.9	68.7	75.7	108.4	75.9	94.1

2 研究方法

2.1 日蒸散量反演

采用 SEBAL 模型计算日蒸散量, 这是由荷兰 Water Watch 公司的 Bastiaanssen 开发的基于遥感的区域蒸散量反演模型, 该模型有清晰的物理意义, 基本原理是地表能量平衡方程。

$$R_n = G + H + \lambda ET + PH(1)$$

式中, R_n 为净辐射量; G 为土壤热通量; H 为感热通量; λET 为潜热通量, 是用于蒸散的那部分能量; PH

是用于植物光合作用和生物量增加的那部分能量, 相对于其它能量分量而言可以忽略。SEBAL 模型的优点在于可以从 TM 影像中直接获取计算日蒸散量所需要的大部分地表特征参数, 不需要太多关于下垫面和气象的信息。通过 TM 影像与 SEBAL 模型计算日蒸散量的基本流程见图 2。

净辐射量是各种热量交换的基础, 是地表能量、物质交换和输送的原动力, 可以通过地表反照率、透射率和比辐射率计算。土壤热通量由 NDVI 和净辐射量、地表反照率等地表特征参数通过经验公式计

算。感热通量可以通过 Monin 与 Obukhov 所提出的迭代循环法计算^[21],计算过程中需要确定地一气温差,在没有地面实测资料的情况下,地一气温差是通过在地表温度分布图上选取“冷点”和“热点”来完成的。“热点”是指没有蒸散活动或蒸散

量非常小以至于可以忽略的像元,可以选择干燥的裸地或休耕地;“冷点”是指地表温度很低,与大气几乎不发生对流的像元,可以选择平静的深水面或长势旺盛、供水充足、完全覆盖的植被。

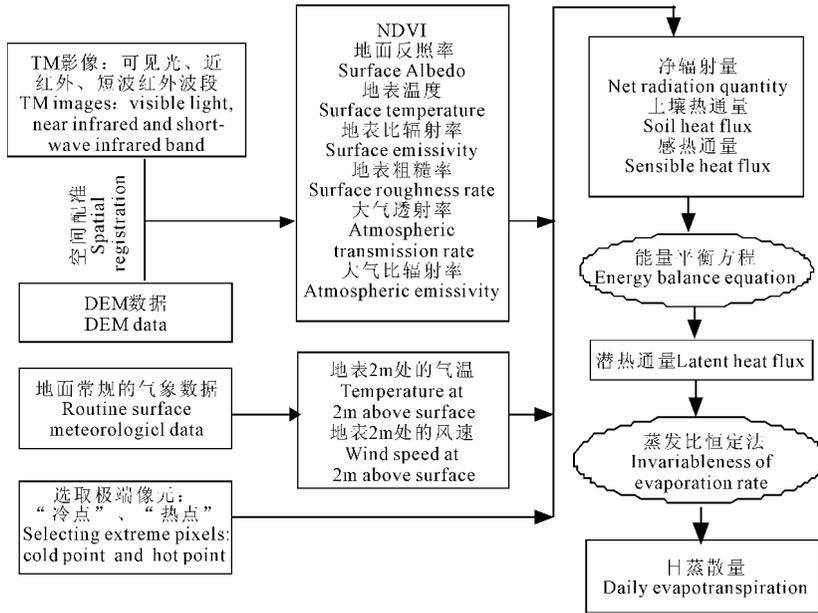


图 2 利用 TM 影像与 SEBAL 模型估算日蒸散量的流程图

Fig.2 Flowchart of daily ET estimation by using TM images and SEBAL model

SEBAL 模型先计算卫星过境时刻的瞬时地表能量通量,再通过时间尺度扩展得到日蒸散量。在此引入蒸发比的概念,其表达式为:潜热通量/(净辐射量-土壤热通量)。相关研究表明,蒸发比在一天当中的变化很小,可以取恒定值。土壤热通量在一天当中白天取正值(吸收短波辐射),夜间取负值(释放长波辐射),总量趋近于 0,计算日蒸散量时土壤热通量可以忽略不计^[22]。因此,可以通过卫星过境时刻的蒸发比与日净辐射量来计算日蒸散量,通过 TM 影像采用 SEBAL 模型计算日蒸散量的详细过程见参考文献[5,6,23~25]。

2.2 月蒸散量反演

TM 影像的时间分辨率为 16 d,在一个月之内过境次数为 1~2 次,因而无法直接通过遥感影像采用 SEBAL 模型估算月实际蒸散量。为了克服 TM 影像时间分辨率不足的问题,在此,将 SEBAL 模型、P-M 公式、作物系数相结合进行时间尺度扩展,进而求得月实际蒸散量。

2.2.1 P-M 公式 FAO-56 中将高度为 0.12 m、固定的表面阻力为 70 s/m、参考冠层的反照率为 0.23、生长旺盛、完全覆盖地面而不缺水的开阔的草地称为参考作物。参考作物在各种气象条件下的日

蒸散量称为参考作物日蒸散量 ET_0 ^[26]。参考作物蒸散量与作物的类型、生长阶段和管理方式没有关系,仅仅受到气象条件的影响,可以通过气象数据计算^[27]。利用 P-M 公式计算参考作物日蒸散量的公式为^[26]:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_{nd} - G_d) + \gamma \frac{900}{T_{mean}} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (2)$$

式中, ET_0 为参考作物日蒸散量(mm/d); R_{nd} 为日净辐射量 [MJ/(m² · d)]; G_d 为日土壤热通量 [MJ/(m² · d)]; γ 为湿度计常数 (kPa/°C); T_{mean} 为地表高 2 m 处的日平均气温(K); u_2 为地表高 2 m 处的日平均风速 (m/s); e_s 为饱和水汽压 (kPa); e_a 为实际水汽压 (kPa); Δ 为饱和水汽压温度曲线斜率 (kPa/°C)。

2.2.2 确定作物系数 作物系数是一个无量纲的值,它将参考作物蒸散量和特定时间、特定作物的实际蒸散量联系起来^[28],它是作物本身生物学特性的反映,与作物的种类、品种、生育阶段、作物群体的叶面积指数有关,是关联实际作物蒸散量与参考作物蒸散量的因子^[29]。FAO-56 中对确定作物系数的

两种方法—双值作物系数法和单值作物系数法,分别进行了详细的论述;双值作物系数法计算精度较高,需要关于作物生长的详细资料数据,计算过程复杂繁琐;单值作物系数法概念简单、方法实用,可以满足一般用途的需要。本研究计算作物系数的目的是通过“ $K_c \cdot ET_0$ 法”进行时间尺度扩展来计算各种地物的月实际蒸散量,采用单值作物系数法就能满足要求。因此,可以将作物系数 K_c 表示为日蒸散量 ET_d 与参考作物日蒸散量 ET_0 的比值,可以表示为:

$$K_c = ET_d / ET_0 \quad (3)$$

2.2.3 确定月蒸散量 作物的生长周期对蒸散量的影响很大,因此不同生长期的作物具有不同的作

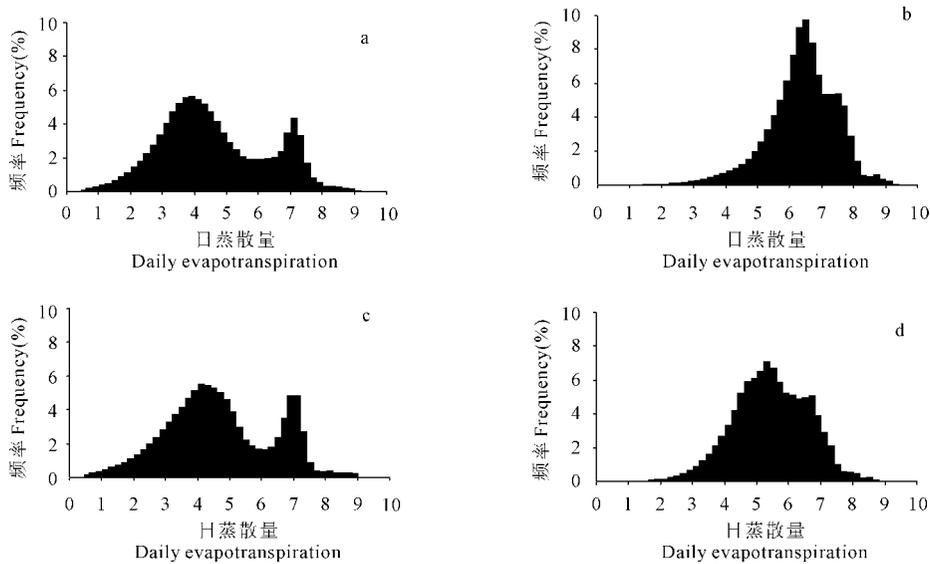
物系数,但是这种变化在一定时期内变化很小,甚至可以认为是不变的^[28]。因此,可以将卫星过境当天的作物系数视为当月的平均作物系数,与当月的总参考作物蒸散量 ET_{0m} 相乘,就能得到月实际蒸散量 ET_m ,在此将这种方法称为“作物系数短期恒定法”,计算公式为:

$$ET_m = ET_{0m} \cdot K_c \quad (4)$$

3 结果分析

3.1 日蒸散量特征

对研究区 4 个时相的日蒸散量进行统计分析与制图,得到图 3、图 4。



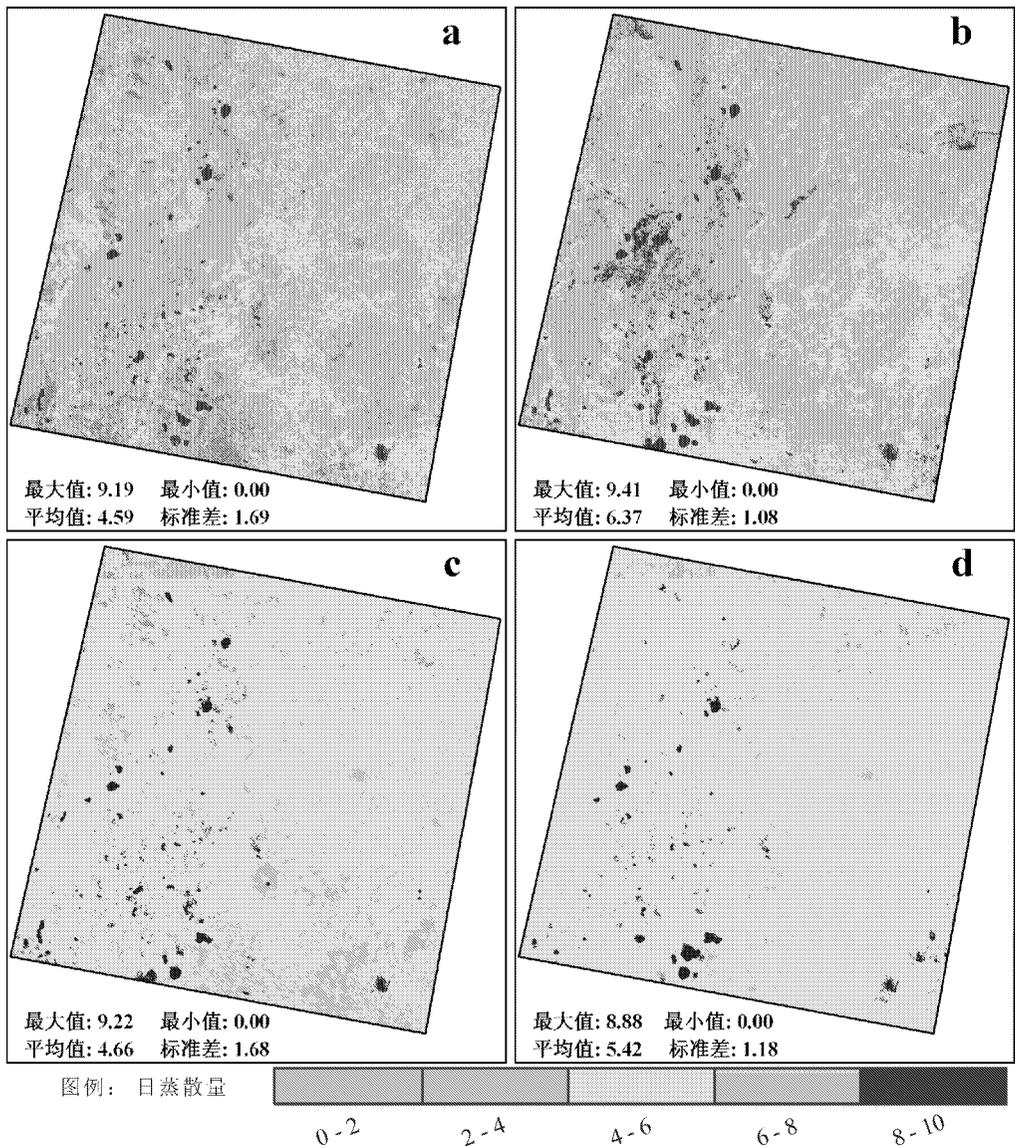
a. 1992-07-09; b. 1994-07-15; c. 1995-07-18; d. 1999-07-13

图 3 各时相的日蒸散量频率分布图

Fig. 3 Frequency distribution map of daily ET for each phase

可以看出,图 3a 与图 3c 极为相似,表明 1992-07-09 与 1995-07-18 这两个时相的日蒸散量频率分布特征很接近,且都呈双峰形态。第一个峰表现为旱地的蒸散特征,因为研究区周围存在大面的旱地,这片旱地为松嫩平原的粮食主产区,主要种植玉米、大豆等粮食作物,此时作物处于灌浆、结荚时期,生命活动十分旺盛;而且遥感影像获取时间为 7 月份,6~9 月为研究区降水丰富的季节,能够使土壤中保持较高含水量,因此植物蒸腾与地表蒸发活动都很强烈,这样就形成了第一个峰,约为 4 mm/d。第二个峰是由水体和湿地的蒸散特征引起的,由于地表存在丰富的积水,土壤含水量基本处于饱和状态,蒸散活动可以不受限制地进行,地表蒸发处于潜在的蒸发水平;而且扎龙湿地生长着茂盛的芦苇,根据王昊等的研究,7 月份芦苇处于生长发育的稳定

期,下垫面通常存留几十至上百厘米深度的水分供应其蒸散的需要^[30],能够保证湿地具有与水体相接近的蒸散速率,这样就形成了第二个峰,约为 8 mm/d。图 3b 与图 3d 分别为时相 1994-07-15 与 1999-07-13 的日蒸散量频率分布图,两者也非常相似,但是这两个时相日蒸散量频率分布图的双峰结构不如时相 1992-07-09 与 1995-07-18 明显,第二个峰仅仅表现为极小的凸起,这是由于整个研究区的日蒸散量都处于较高的水平,旱地、湿地、水体的日蒸散量之间没有明显的差异,因此日蒸散量频率分布图上没有明显的过渡。时相 1994-07-15 的频率分布图中,有接近 90% 的像元的日蒸散量为 5~8 mm/d,而时相 1999-07-13 的日蒸散量主要分布在 4~7 mm/d,约占总像元的 80%。



a. 1992-07-09; b. 1994-07-15; c. 1995-07-18; d. 1999-07-13

图 4 各时相日蒸散量空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution map of daily ET for each phase

从图 4 中日蒸散量的平均值来看,这 4 个时相的日蒸散量依照 1994-07-15、1999-07-13、1995-07-18、1992-07-09 的顺序依次递减。结合各时期的土地利用类型空间分布图与图 4 进行分析,发现水体的日蒸散量最高,为 8~10 mm/d;湿地次之,为 6~8 mm/d;旱地日蒸散量的时间变异较大。在时相 1992-07-09 大部分旱地的日蒸散量为 2~4 mm/d,少部分为 4~6 mm/d;而时相 1994-07-15 上旱地的日蒸散量明显高于其它 3 个时相,约为 6~8 mm/d,甚至与湿地的日蒸散量相接近,造成这种蒸散特性主要是由降水量造成的;通过分析影像获取之前 20 天该研究区的降水特征(见表 3),发现时相 1994-07-15 的影像过境之前 20 d 研究区的

平均总降水量为 110.54 mm,高于其它 3 个时相,丰富的降水使土壤含水量保持在较高的水平,从而为蒸散活动提供了丰富的水源,因此旱地的植物蒸腾与地表蒸发活动都很旺盛;时相 1995-07-18 旱地的日蒸散量为 2~6 mm/d,略高于 1992-07-09;时相 1999-07-13 上绝大部分旱地的日蒸散量为 4~6 mm/d,在研究区北部较小的区域内,还有一小部分旱地的日蒸散量为 2~4 mm/d;日蒸散量为 0~2 mm/d 的区域主要分布在休耕地、盐碱地及居民地。

3.2 参考作物日蒸散量与作物系数特征

通过 P-M 公式结合插值后研究区当天的气象数据(插值后研究区各时相的主要气象要素的平均值如表 3 所示)进行计算,得到 4 个时相的参考作物

日蒸散量,并通过式(3)得到各时相的作物系数,经过统计分析发现 ET_0 与 K_c 具有表 4 所示的特征。

表 3 各时相插值后主要气象要素的平均值

Table 3 Mean value of major meteorological factors after interpolated for each phase

项目 Items	1992— 07—09	1994— 07—15	1995— 07—18	1999— 07—13
日最高气温(°C) Max· temperature	30.10	30.78	31.83	33.41
日最低气温(°C) Min· temperature	13.86	18.55	18.08	23.27
日平均气温(°C) Mean temperature	23.04	24.98	25.28	28.58
日平均相对湿度(%) Relative humidity	54.08	68.72	58.59	69.95
日平均风速(m/s) Wind speed	1.90	1.56	2.43	2.31
日照时数(h) Sunshine duration	13.34	13.28	13.63	12.25
影像过境之前 20 d 的总降水量(mm) Total precipitation in 20 days before image sensing	41.94	110.54	40.88	82.62

将表 3 中的 6 项气象要素作为自变量,表 4 中 ET_0 的平均值作为因变量进行逐步回归分析,设定自变量进入回归方程、从回归方程中移除的 F 检验统计量的概率标准为 0.05 与 0.1。经过分析发现平均风速、日照时数、日最低气温三个变量对参考作物日蒸散量的影响较为明显,最终只有这三个自变量进入回归方程,回归方程为: $Y=0.811X_1-0.099X_2+0.002X_3+5.599$ (Y 为研究区参考作物日蒸散量的平均值; X_1 为日平均风速; X_2 为日照时数; X_3 为日平均气温)。

表 4 各时相 ET_0 与 K_c 的统计特征

Table 4 Statistic characteristics of ET_0 and K_c for each phase

项目 Items	1992—07—09		1994—07—15		1995—07—18		1999—07—13	
	ET_0	K_c	ET_0	K_c	ET_0	K_c	ET_0	K_c
最大值 Max·	6.05	1.58	5.78	1.75	6.50	1.51	6.43	1.42
最小值 Min·	5.62	0.00	5.25	0.00	5.92	0.00	6.08	0.00
平均值 Mean	5.85	0.79	5.59	1.14	6.26	0.75	6.31	0.86
标准差 Deviation	0.07	0.29	0.10	0.19	0.12	0.27	0.06	0.19

分析作物系数的特征,可以发现时相 1994—07—15 的作物系数明显高于其它 3 个时相。1992—07—09 与 1994—07—15、1995—07—18 与 1999—07—13 的参考作物蒸散量的平均值很接近,而作物系数却存在很大的差别。在参考作物蒸散量非常接近的而作物系数有很大的差别情况下,根据式(3),可以看出气象要素不是造成作物系数差异的最主要的原因,而是由实际日蒸散量的差异造成的。图 3、图 4 也正好证明了各个时相的实际日蒸散量存在的巨大差异,说明实际蒸散量与作物的生长阶段、土壤含水量等因素具有密切的联系。这也是作物系数的意义所在,通过作物系数能够把参考作物的蒸散量与特定条件下的实际蒸散量联系起来,为蒸散量反演的时间尺度扩展提供了帮助。

利用 TM 影像通过非监督分类与基于知识的决策树分类方法相结合的方法进行分类得到研究区的土地利用类型空间分布图,通过统计不同时相、不同土地利用类型的作物系数并制图得到图 5。

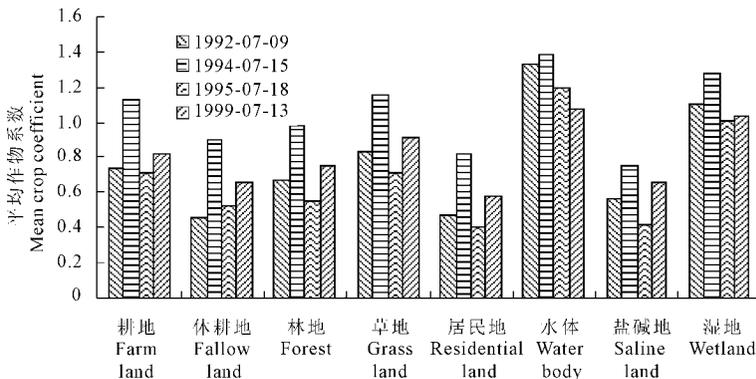


图 5 各时相主要土地利用类型的平均作物系数

Fig. 5 Mean K_c of each phase for major land-use types for each phase

从土地利用类型来看,水体、湿地的作物系数最高,在 4 个时相上均大于 1;草地、耕地次之,但在时

相 1992—07—09 仍大于 1;居民地的作物系数最低,但不为零,这与居民地建筑物的蒸散特性明显不符,

造成这种现象的原因主要是混合像元的存在,农村居民点单个建筑物的面积一般小于一个 TM 像元,大部分像元中夹杂着绿地、裸露水面等地物,这些地物与建筑物相间隔存在,由于其水热条件差异较大,容易产生局部平流热交换,导致这些绿地与水面具有较高的日蒸散量,因此居民点的作物系数大于零。从时间角度来看,时相 1992-07-09 上各种土地利用类型的作物系数明显高于其他时相,时相 1995-07-18 的作物系数最低,这两个时相上参考作物蒸散量的平均值相差较大,而实际日蒸散量的平均值却很接近,这种特征说明了除了气象因素之外,作物的长势特征也是影响实际日蒸散量的重要因素。

3.3 月蒸散量特征

通过 1992、1994、1995、1999 年 7 月的日值气象

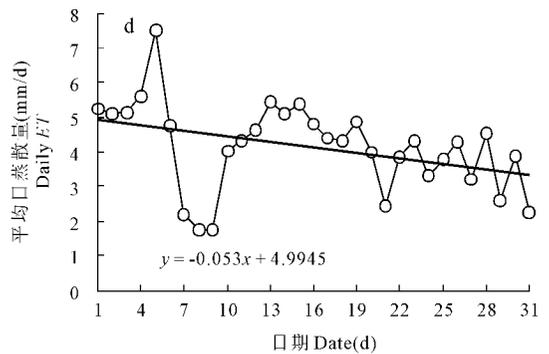
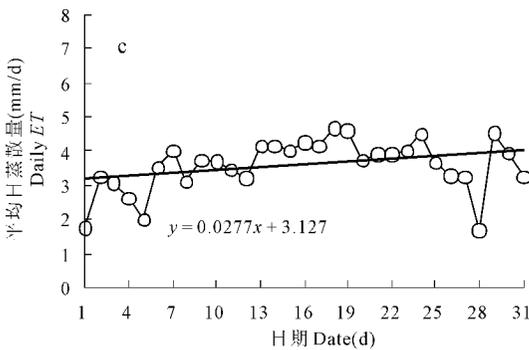
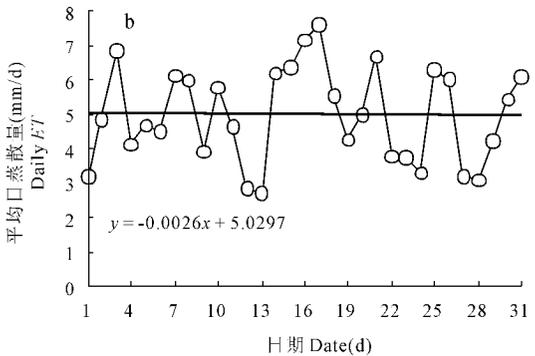
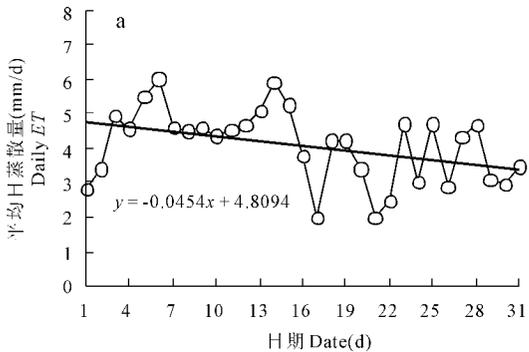
数据及 P-M 公式可以得到日参考作物蒸散量,通过 2.2.3 中所述的“作物系数短期恒定法”进行时间尺度扩展最终得到月蒸散量。

经过统计分析得到表 5 所示的月蒸散量统计特征。通过绘制所选时相所在的 7 月份的“日期-平均日蒸散量”曲线图,并添加趋势线得到图 6a~d。

表 5 各时相 ET_m 的统计特征

Table 5 Statistic characteristics of ET_m for each phase

项目 Items	1992-07	1994-07	1995-07	1999-07
最大值 Max	256.56	232.98	220.45	212.43
最小值 Min	0.00	0.00	0.00	0.00
平均值 Mean	126.58	154.66	110.70	128.55
标准差 Deviation	47.21	26.28	40.41	28.93



a. 1992-07; b. 1994-07; c. 1995-07; d. 1999-07

图 6 各时相 7 月份平均日蒸散量变化趋势

Fig. 6 The trend of daily ET in July for each phase

可以看出,各时相遥感影像所在的 7 月份的研究区平均月蒸散量依照 1994-07、1999-07、1992-07、1995-07 的顺序依次减少。从影像所处的 7 月份的研究区平均日蒸散量变化趋势来看,1992-07 与 1999-07 的平均日蒸散量呈下降趋势;1994-07 的平均日蒸散量基本处于稳定状态,没有表现出明显的变化趋势;而 1995-07 的平均日蒸散量呈下降趋势。根据研究区气温的年内变化特征,7 月份的气温应该是随着日期增加而逐渐上升的,直到 8 月

份会达到一年内的最高值,而平均日蒸散量并没有都表现出随着日期增加而逐渐上升的特征,说明气温的高低不是实际日蒸散量多寡的决定性因素,应该还与土壤、植被等因素有着密切的关系。

4 结论及讨论

SEBAL 模型是目前国际上应用极为广泛的区域蒸散量反演模型;P-M 公式是 FAO 推荐的基于“单点”的计算参考作物蒸散量的唯一方法。采用基于

地表能量平衡的 SEBAL 模型与基于能量平衡原理、水汽扩散原理及空气热导定律的 P-M 公式,结合气象数据、DEM 及合适的遥感影像来反演区域实际日蒸散量、实际月蒸散量具有较好的理论基础,能快速、便捷地反演区域蒸散量,能方便地进行地图可视化显示,具有很强的现实性。

通过对参考作物日蒸散量影响因素的敏感性分析,发现参考作物日蒸散量与日平均风速、日照时数及日最低气温的关系比较密切。而实际日蒸散量、作物系数除了受到气象要素的影响之外,还受到下垫面及地物覆盖特征的影响,定量研究蒸散量与下垫面特征的关系将是蒸散研究、生态环境建设的重要主题。

虽然利用遥感技术反演区域蒸散量已经取得了很大进步,通过本研究发现遥感蒸散研究还存在一些不足:(1)通过选取“冷点”与“热点”的方式估算地、气之间温差的方法具有较大的主观性,极端像元的选取将会影响感热通量的精度,最终会引起日蒸散量的误差;(2)遥感获取的是地表瞬时信息,由此反演的参数以及估算的能量通量只能代表瞬时状况,必须对瞬时信息进行时间尺度扩展,本研究采用了蒸发比恒定法,这种方法在晴空条件具有较高的精度,在其他条件下应用此种方法还有待修正;(3)利用 P-M 公式与作物系数进行时间尺度扩展的时候,还需要进一步了解作物的物候信息,以确保需要扩展的那个时间段位于同一物候期内,即作物处于相同或相近的生长阶段,否则应用此方法计算更长时间尺度的蒸散量时将会产生很大的误差。

参考文献:

[1] 水利部国际合作司等编译. 美国国家灌溉工程手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998, 31.

[2] 马柱国, 符淙斌, 谢力, 等. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 563-568.

[3] 刘昌明, 孙蓉. 水循环的生态学方面: 土壤-植被-大气系统水分能量平衡研究进展[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 251-259.

[4] Bastiaanssen W G M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 229, 87-100.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Kite G W, P Droggers. Comparing evapotranspiration estimates from

satellites, hydrological models and field data [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 114, 395-411.

[8] Hunk B, Van Den. Energy balance based surface flux estimation from satellite data and its application for surface moisture assimilation [J]. *Meteorological and Atmosphere Physics*, 2001, 76, 43-52.

[9] 王介民, 高峰, 刘绍民. 流域尺度 ET 的遥感应用 [J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(5): 332-338.

[10] 刘志武, 雷志栋, 党安荣, 等. 遥感技术与 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.

[11] 李红军, 雷玉平, 郑力, 等. SEBAL 模型及其在区域蒸散发研究中的应用 [J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(3): 321-325.

[12] Ma Yaoming, Osmu T. Combining satellite remote sensing with field observations for landsurface heat fluxes over inhomogeneous landscape [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002.

[13] Ma Yaoming, Mneneti M. Remote sensing parameterization of regional land surface heat fluxes over arid area in northwest China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57: 257-273.

[14] Tong Ling, Kang Shaozhong, Zhang Lu. Temporal and spatial variations of evapotranspiration for spring wheat in the Shiyang river basin in northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87: 241-250.

[15] Cai Jiabing, Liu Yu, Lei Tingwu, et al. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 45: 22-35.

[16] Suleimana A A, Tojo Soler C M, Hoogenboom G. Evaluation of FAO-56 crop coefficient procedures for deficit irrigation management of cotton in a humid climate [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 91: 33-42.

[17] 刘晓英, 李玉中, 王庆锁. 几种基于温度的参考作物蒸散量计算方法的评价 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 12-18.

[18] 史晓楠, 王全九, 王新, 等. 参考作物腾发量计算方法在新疆地区的适用性研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 19-23.

[19] 梁丽乔, 闫敏华, 邓伟, 等. 松嫩平原西部参考作物蒸散量变化过程 [J]. 地理科学进展, 2006, 25(3): 22-31.

[20] 司建华, 冯起, 张小由, 等. 植物蒸散耗水量测定方法研究进展 [J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 450-459.

[21] Monin A S, Obukhov A M. Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere [J]. *Trudy Geofizicheskogo Institute, Akademiya Nauk SSSR*, 1954, 151(24): 163-187.

[22] Morse A, Tasumi M, Allen R G, et al. Application of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and streamflow depletion in the Bear River Basin of Idaho through remote sensing [R]. Final report submitted to the Raytheon System Company, Earth Observation System Data and Information System Project, by Idaho Department of Water Resources and University of Idaho, 2000.

[23] Wim J T, William P K, Martha C A, et al. An intercomparison of the surface temperature energy balance algorithm for land (SEBAL) and the two-source energy balance (TSEB) modeling schemes [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108: 369-384.

[24] 陈玲. 基于改进的 SEBAL 模型估算区域蒸散发 [D]. 兰州: 兰州大学, 2007.

(下转第 234 页)

Evaluation of the ecosystem service's value function of an oasis in arid areas

—Taking Minqin Oasis as an example

YANG Chun-li, BAI Yong-ping

(College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Evaluating the ecosystem service's value of an oasis could help study quantitatively the development and changes of the oasis' ecosystem. Based on the statistical data of Minqin Oasis in the lower reaches of Shiyang River from 1994 to 2007, this paper estimated the ecosystem service's value of the Minqin County. The result showed that the annual value of the ecosystem service in the lower reaches of Shiyang River was 102.04×10^8 Yuan in 1994, and 79.04×10^8 Yuan in 2007. During the 14 years, the value of the ecosystem service had been reduced by 23×10^8 Yuan in the area. The main reason for the dropping of the service value of the oasis' ecosystem is grassland reduction, so the important task of oasis ecological environment construction in arid areas is to protect oasis ecological environment, restore and enhance oasis ecosystem service function.

Keywords: arid area; ecosystem service value; Minqin Oasis

(上接第 224 页)

- [25] 曾丽红, 宋开山, 张 柏, 等. 应用 Landsat 数据和 SEBAL 模型反演区域蒸散发及其参数估算[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(3): 155-163.
- [26] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- [27] 陈玉民, 郭国双, 王广兴. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利水电出版社, 1995.
- [28] Buman R, Pochop L O. Evaporation, evapotranspiration and climate data[M]. Elsevier Amsterdam, 1994.
- [29] 王 健, 蔡焕杰, 刘红英. 利用 Penman-Monteith 法和蒸发皿法计算农田蒸散量的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 67-71.
- [30] 王 昊, 许土国. 扎龙湿地芦苇沼泽计算与分析[J]. 水利水电技术, 2005, 36(2): 22-25.

Applying SEBAL model and P—M Equation to estimate land-surface evapotranspiration over lower reaches of Wuyu'er River

ZENG Li-hong^{1,2}, SONG Kai-shan¹, ZHANG Bai¹, WANG Zong-ming¹, DU Jia^{1,2}

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130012, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Daily evapotranspiration (ET) of 1992-07-09, 1994-07-15, 1995-07-18 and 1999-07-13 was estimated by using SEBAL model over lower reaches of Wuyu'er River. Monthly ET of July for each phase was obtained by using P—M equation and crop coefficient. Lastly, characteristics of daily ET, monthly ET, crop coefficient and their affecting factors were analyzed. The results indicated that: the frequency distribution maps of daily ET had two distinct apices, one was caused by the evapotranspiration characteristics of dry-land, and the other was caused by wetland and water-body; according to mean daily ET the sequence from high to low was 1994-07-15, 1999-07-13, 1995-07-18 and 1992-07-09; the phase of 1994-07-15 presented the highest mean daily ET and mean crop coefficient; daily mean wind velocity, sunshine time and minimum daily air temperature played great influence on daily reference evapotranspiration. This study would provide important reference for the study of crop water requirement, ecological water demand, evapotranspiration characteristics of different land-use types and water resources management over the study area.

Keywords: remote sensing; evapotranspiration; SEBAL; P—M Equation; crop coefficient