

# 黄河三角洲日蒸散发遥感估算及其空间格局特征分析

朱明明<sup>1,2</sup>, 李明杰<sup>1,2</sup>, 侯西勇<sup>1</sup>

1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003

2. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 蒸散发是水循环中的一个重要过程, 研究蒸散发对农业灌溉、水资源合理利用和地区生态环境的可持续发展均有重要意义。本文基于 Landsat TM 数据和 SEBAL 模型, 详细介绍了日蒸散发遥感估算的方法, 分析了黄河三角洲蒸散发的数值特征和空间格局特征, 并在此基础上研究了土地利用类型与蒸散发的关系。结果表明, 2009 年 6 月 4 日黄河三角洲日蒸散发量在 0—9.11mm, 平均值为 5.31mm。蒸散量的空间分异特征较为显著, 受下垫面条件的影响突出, 高值区主要分布在东部以林地为主的国家级自然保护区和河口区大范围的盐田和养殖池、中部东营市区周边的平原水库区以及南部广饶县的优质农田区域。水体、林草地、建设用地和未利用地的日蒸散发空间分布频率图均呈单峰分布, 耕地受作物类型空间分布差异等因素的影响而呈现为较明显的双峰分布。土地利用类型决定了日蒸散发的水平, 不同下垫面蒸散发量的日均值从大到小依次为: 水体、滩涂、苇地、林草地、耕地、建设用地和未利用地。

**关键词** 蒸散发; 陆面能量平衡算法; 土地利用; 黄河三角洲

中图分类号 TP79, P426.2\*2

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.23.001

## Daily Evapotranspiration Estimation by Remote Sensing Method and Its Spatial Pattern Analysis on the Yellow River Delta

ZHU Mingming<sup>1,2</sup>, LI Mingjie<sup>1,2</sup>, HOU Xiyong<sup>1</sup>

1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong Province, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Evapotranspiration (ET) is an important part of the water cycle; therefore, the studies on ET are of great importance to the improvement of irrigation efficiency, regional wise water management, and the sustainability of ecosystem. The calculation method of daily ET using Landsat TM and Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) model is described in detail. Furthermore, the quantitative characteristics, spatial patterns of ET are analyzed. And then, the spatial relationships between ET and land utilization types are studied. The result shows that ET ranges from 0.05 mm to 9.11 mm with the mean value of 5.31 mm. Spatial differences of daily ET in the Yellow River Delta (YRD) are significant for different land utilization types. High ET are mainly distributed in the National Nature Reserve located in the eastern part of Dongying City, saltern and sea water culture zones in the Hekou District, the surrounding reservoirs of the central urban area of Dongying City, and high-quality farmland in Guangrao Country. The daily ET takes on a single-peak curve in water body, grassland and forest, construction area, and unused land, but a double-peak curve in farmland. Land utilization types decide the level of ET. The mean values of daily ET in the descending order are water body, beach, reed land, grassland and forest, farmland, construction area, and unused land.

**Keywords** ET; SEBAL; land utilization; YRD

收稿日期: 2012-02-23; 修回日期: 2012-06-19

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (kzcx2-yw-224); 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室开放基金项目 (2007KFJJ02); 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金项目 (2007490211)

作者简介: 朱明明, 博士研究生, 研究方向为海岸带环境与生态遥感, 电子信箱: mmzhu@yic.ac.cn; 侯西勇 (通信作者), 研究员, 研究方向为海岸带 LUCC 及其环境效应、海岸带遥感与 GIS 应用、海岸带综合管理, 电子信箱: xyhou@yic.ac.cn

## 0 引言

蒸散发 (Evapotranspiration, ET) 包括土壤蒸发和植被蒸腾, 是地表能量平衡和水量平衡的重要组成部分。在全球气候变化的背景下, 区域降水波动与水资源短缺等问题日渐突出, 蒸散发在水循环过程中的地位和作用及其与区域水资源短缺的相互关系等已经受到越来越多的关注。蒸散发是水循环过程中最容易受下垫面土地利用影响的一个环节, 估算并分析区域尺度不同土地利用类型的蒸散量, 不仅能够丰富对全球气候变化区域响应特征的理解, 而且对于区域农业灌溉、水资源合理与高效利用以及生态保育等实践也都具有显著的指导作用。

从 1802 年著名的道尔顿蒸发定律的提出以来, 人们就不断尝试从物理学和气象学的角度来研究蒸散发。但传统的蒸散发估算方法主要基于点尺度, 由于下垫面物理性质空间差异显著, 估算结果仅适用于较小的区域。计算大范围区域的蒸散发则需要借助空间插值的方法, 但估算模型中的气象数据较难获取, 所以研究成果难以推广<sup>[1]</sup>。直到 20 世纪后期, 遥感技术的发展解决了上述难题, 借助遥感技术估算蒸散发克服了以点代面方法造成的误差, 为区域尺度蒸散发估算提供了更为准确和有效的方法。遥感估算蒸散发的模型可概括为 3 类<sup>[2-5]</sup>: (1) 传统方法与遥感方法结合模型, 如: Penman-Monteith (P-M) 模型<sup>[6]</sup>、互补相关法<sup>[7]</sup>、统计经验模型<sup>[8]</sup>和温度-植被指数特征空间法<sup>[9]</sup>; (2) 基于能量平衡原理的单层和双层模型, 如: 简化地表能量平衡指数 (S-SEBI)<sup>[10]</sup>、地表能量平衡系统 (SEBS)<sup>[11]</sup>、陆面能量平衡算法 (SEBAL)<sup>[12-13]</sup>、内化校准高分辨率蒸散发制图 (METRIC)<sup>[14]</sup>等单层模型和 Shuttleworth-Wallance 双涌源能量守恒模型<sup>[15]</sup>、双层能量平衡模型 (TSEB)<sup>[16]</sup>、大气-陆地交换反演模型 (ALEXI) 等双层模型<sup>[17]</sup>; (3) 陆面数据同化方法, 如: 在陆面过程模式基础上预报土壤水分和地表能量通量<sup>[18]</sup>。遥感获取的植被指数和地表温度是反映蒸散发信息的重要参数, 利用两者构成的特征空间已被综合应用于区域蒸散发研究中, Tang 等<sup>[19]</sup>提出一种定量确定地表温度-植被指数三角空间中干湿边的计算方法, 采用 2008 年 MODIS 数据和简化的 Priestley-Taylor 经验公式计算了黑河流域的蒸散发, 遥感估算的显热通量与大孔径闪烁仪监测的结果相一致, 均方差为  $25.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。基于能量平衡原理的单层模型的关键是空气动力学阻抗的计算, 通过下垫面和常规气象资料较容易求解, 因此应用广泛, 特别是 SEBAL 和 SEBS 模型被众多研究证明是蒸散发估算的有效方法; 而在单层模型基础上发展的双层模型对土壤和植被分别模拟蒸散发, 阻抗定义较为复杂, 需要更丰富的非遥感资料, 因此推广应用难度较大。何延波等<sup>[20]</sup>利用 MODIS 数据和 SEBS 模型估算了黄淮海地区的区域蒸散量, 并分析了各种地表覆盖下的蒸散发统计分布特征。李宝富等<sup>[21]</sup>采用 SEBAL 模型和 Landsat TM 影像估算了塔里木河干流区蒸散发, 利用三个气象站点数据结合 FAO-56 P-M 公式进行结果验证, 并对不同土地利用/覆被类型的蒸散发进行统计分析。Mutiga 等<sup>[22]</sup>通过 MODIS 资料 and

SEBAL 模型估算肯尼亚 Ewaso Ngiro 河北部流域的年蒸散发并分析其时空分布特征, 分别采用 FAO-56 P-M 方法和水量平衡方法对两种时间尺度的结果进行验证, 和遥感估算结果的相关性分别达到 0.75 和 0.70。杨红娟等<sup>[23]</sup>将谐波法和 TSEB 双源遥感模型耦合起来模拟估算土壤热通量和蒸散发, 认为土壤组分对地表潜热通量的贡献越大, 潜热通量的模拟精度越高。陆面数据同化方法能够弥补蒸散发反演时间不连续的问题, 成为近年来国内外陆面过程和水文过程研究的热点。Pipunic 等<sup>[24]</sup>采用 EnKF 方法将遥感数据同化到地表模型 (LSMs) 中, 提高了潜热和显热通量的模拟精度。与传统方法相比, 蒸散发遥感反演已经具有不可替代的优势, 而陆面数据同化和区域尺度地面验证方法的发展则进一步促进了遥感反演方法的时间尺度扩展及精度水平的提高。

近年有众多学者借助遥感技术对黄河三角洲区域蒸散发进行了相关研究。潘志强等<sup>[25]</sup>采用 ETM+ 数据和 SEBAL 模型估算黄河三角洲 2000 年日蒸散发量, 遥感估算的水面蒸发值和气象站测得的水面蒸发值平均相对误差为 14.7%, 模拟结果较为合理。张长春等<sup>[26]</sup>采用 NOAA 数据和 SEBS 模型计算了黄河三角洲 1991—2000 年的蒸散发量, 分析其 10 年内的数量特征和空间分布特征, 遥感估算结果与德州试验场的实测值有较强的相似性。李发鹏等<sup>[27]</sup>基于 MODIS 数据和 SEBS 模型估算 2001 年黄河三角洲区域年内蒸散发量, 在月尺度和日尺度上分别与蒸发皿蒸发量、FAO-56 P-M 公式及其它研究成果作对比分析, 结果表明模型模拟的结果较为合理。刘朝顺等<sup>[28]</sup>利用 Landsat 数据和 SEBAL 模型估算 1987 年和 2000 年垦利县的蒸散发量, 分析蒸散发对 LUCC 的响应, 蒸发皿资料的验证结果证实 SEBAL 具有较好的反演精度。Jia 等<sup>[29]</sup>应用 MODIS 数据和 SEBS 模型估算黄河三角洲 2005 年日蒸散发量, 采用 HANTS 算法插补数据缺失像元的日蒸散, 从而得到月蒸散和年蒸散, 结果显示, 遥感反演的日蒸散发量与 FAO-56 P-M 方法获得的结果有很好的 consistency, 湿地植被种类的复杂性及其生长季节的差异性、空间分布的非均匀性造成黄河三角洲湿地的蒸散发在空间分布上有显著不同。

上述针对黄河三角洲蒸散发的早期研究对科学认识该区域蒸散发时空特征具有重要的意义, 但该区域的环境和生态比较脆弱, 多易变, 对气候变化和人类活动的响应尤为迅速和强烈, 蒸散发受气候和下垫面覆盖的影响深刻, 近年来表现出了新的特征, 因此, 对该区域蒸散发的新近特征开展研究十分必要。本文采用 SEBAL 模型估算 2009 年 6 月 4 日黄河三角洲日蒸散发量, 研究蒸散发与土地利用类型之间的关系, 有助于更加清楚地认知蒸散发的数量和空间格局特征, 为水资源的合理开发利用和地区生态环境的可持续发展提供理论依据。

## 1 研究区及资料准备

### 1.1 研究区概况

黄河三角洲位于渤海湾南岸和莱州湾西岸, 是具有国际

意义的河口与滨海湿地。本文以东营市行政区为研究区,包括东营和河口 2 个区以及广饶、利津和垦利 3 个县。东营市位于 118°00'E—119°20'E 和 36°55'N—38°16'N 之间,属北温带半湿润大陆性气候,年平均气温 12.3℃,年降水量 537.3mm,年均蒸发量 1900mm 左右,年均风速 4m/s 左右,降水年内分配不均匀且蒸发量大。地貌特征主要为海拔小于 7m 的低平原。主要的生态环境问题有土壤盐渍化、地下淡水资源严重缺乏等<sup>[30]</sup>。淡水资源不仅是区域经济社会发展的重要支撑,也是区域生态保育及生态修复的主要制约因素,针对该区域水循环过程、水资源、水环境和水生态等问题的研究已经是当前国内外多学科交叉研究的热点。

### 1.2 基础资料准备

(1) Landsat5 TM 影像:2009 年 6 月 4 日上午 10:30 成像,Path/Row 为 121/34,获取时刻晴朗无云,影像预处理包括辐射定标、几何校正、研究区裁剪等;(2) 野外同步实测气象参数信息(37.93°N,118.51°E):利用 HOBO 自动气象站监测获取,每 10min 取一个数据集,包括太阳辐射、温度、相对湿度、风速,测量高度分别为 2.5、1.5、1.5、2m;(3) 土地利用数据:对 2009 年 6 月 4 日的 Landsat5 TM 影像进行目视解译而得到,解译时参考东营市 2005 年、河口区 2007 年的土地利用数据。2009 年和 2010 年分别对研究区进行了 3 次实地考察,采集地物样点 120 个,完成土地利用分类结果的修正,提高了目视解译的准确度。

## 2 研究方法

SEBAL(Surface Energy Balance Algorithm for Land)模型是 Bastiaanssen 提出的基于遥感的区域蒸散发估算模型,被广泛应用于不同气候条件下的国家和地区<sup>[31-33]</sup>。遥感影像和气象数据是 SEBAL 模型的主要输入参数,其中,遥感影像必须具有可见光、近红外和热红外波段,如 TM、ETM+、AVHRR、MODIS、ASTER 等数据。模型分别计算净辐射通量、土壤热通量和感热通量,通过余项法求得潜热通量,进而得到瞬时蒸散发。地表能量平衡方程表达式为

$$R_n - G - H - \lambda ET = 0 \quad (1)$$

式中, $R_n$  为净辐射通量,  $W \cdot m^{-2}$ ;  $G$  为土壤热通量,  $W \cdot m^{-2}$ ;  $H$  为感热通量,  $W \cdot m^{-2}$ ;  $\lambda ET$  为潜热通量,  $W \cdot m^{-2}$ ;  $\lambda$  为水的汽化潜热,  $2.49 \times 10^6 W \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$ ;  $ET$  为蒸散发,  $mm$ 。

计算蒸散发所需的各个参数的具体方法如下,图 1 是估算瞬时蒸散发的具体流程。

### 2.1 净辐射通量

净辐射通量  $R_n$  是能量平衡方程中能量的主要来源,是地表短波辐射与长波辐射的净收支。表达式为

$$R_n = (1 - \alpha) R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon) R_{L\downarrow} \quad (2)$$

式中, $R_n$  为净辐射通量,  $100-700 W \cdot m^{-2}$  之间;  $R_{s\downarrow}$  为下行的太阳短波辐射,即太阳总辐射;  $R_{L\downarrow}$  为下行的长波辐射;  $R_{L\uparrow}$  为地表发射的长波辐射;  $\alpha$  为地表反照率,  $\varepsilon$  为地表比辐射率。

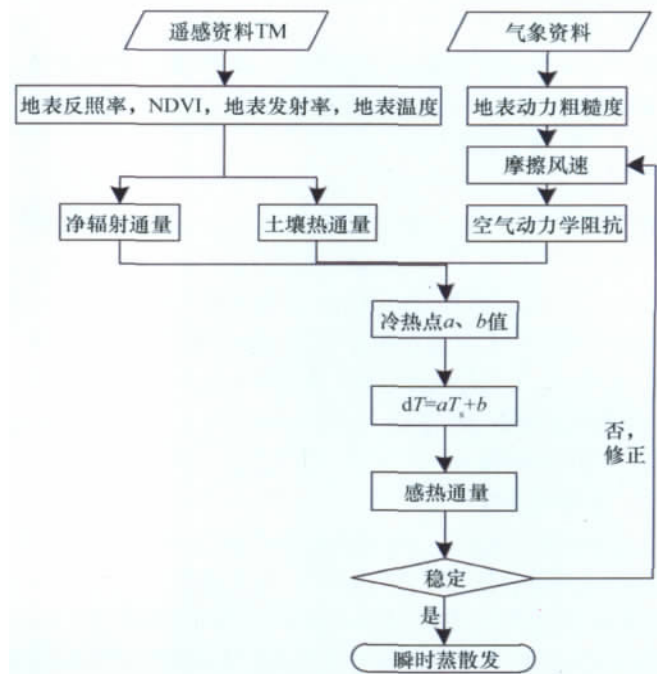


图 1 瞬时蒸散发估算流程图

Fig. 1 Flow chart of the instantaneous ET computation

### 2.1.1 地表反照率

计算各波段光谱幅亮度、表观反照率,进而通过线性组合求得大气层顶地表反照率,代入以下方程求解:

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{path, radiance}}{\tau_{sw}^2} \quad (3)$$

式中, $\alpha_{toa}$  为大气层顶反照率,  $\alpha_{path, radiance}$  为程辐射,在 0.025—0.04 之间,参照 Morse 等<sup>[34]</sup>研究,本文选取经验值 0.03;  $\tau_{sw}$  为大气单向透射率,曾丽红等指出,对于面积小且海拔低的研究区,可以取 0.75,对于面积大的区域,可通过高程函数估算<sup>[35]</sup>:

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times Z \quad (4)$$

式中, $Z$  为高程,  $m$ 。

SEBAL 模型通过两个极值条件下 ( $ET_{max}$  和  $ET_{min}$ ) 的能量平衡估算各个像元的蒸散发的设计特点,使得由大气透射率和程辐射的不确定性引起的反照率误差只占蒸散发估算误差中很小一部分,经过公式(3)和(4)修正的地表反照率可满足要求<sup>[36-37]</sup>。

### 2.1.2 地表比辐射率

地表比辐射率可以通过 NDVI 指数近似求取<sup>[38]</sup>,当 NDVI 小于 0 时,  $\varepsilon$  取 1<sup>[34]</sup>。

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.047 \times \ln(NDVI) \quad (5)$$

### 2.1.3 地表温度

大气等因素影响 TM 传感器接收到的地表热辐射,通常可通过单通道法<sup>[39]</sup>、单窗算法<sup>[40]</sup>对地表温度进行反演,而 SEBAL 模型采用 Wukelic 等<sup>[41]</sup>提出的相对简单的方法计算地表温度,在蒸散发的反演中也得到了较好的结果<sup>[37]</sup>。

$$T_s = K_2 / (\varepsilon^{0.25} \cdot \ln(K_1 / L_6 + 1)) \quad (6)$$



式中,  $L_6$  为第 6 波段的光谱辐亮度,  $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$ ;  $K_1$  为辐射定标常数,  $607.76 W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$ ;  $K_2$  为温度定标常数,  $1260.56 K$ 。

### 2.1.4 长、短波辐射

$$R_{s\downarrow} = G_{sc} \cdot \cos\theta \cdot d_r \cdot \tau_{sw} \quad (7)$$

$$R_{l\downarrow} = 1.08 (-\ln\tau_{sw})^{0.265} \cdot \sigma \cdot T_{cold}^4 \quad (8)$$

$$R_{l\uparrow} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (9)$$

式中,  $G_{sc}$  为太阳常数,  $1367 W \cdot m^{-2}$ ;  $\theta$  为太阳天顶角 ( $^\circ$ );  $T_{cold}$  为冷点空气温度,  $K$ ;  $\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数 (取  $5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ );  $R_{s\downarrow}$  为下行短波辐射, 在  $200-1000 W \cdot m^{-2}$  之间;  $R_{l\downarrow}$  为下行长波辐射, 在  $200-500 W \cdot m^{-2}$  之间;  $R_{l\uparrow}$  为上行长波辐射, 在  $200-700 W \cdot m^{-2}$  之间。

## 2.2 土壤热通量

土壤热通量  $G$  是土壤内部的热交换, 与热流方向的土壤梯度、土壤热容量、热扩散率成正比<sup>[42]</sup>。土壤热通量较难估算, SEBAL 模型采用 NDVI、地表反照率、温度与净辐射通量的经验公式来计算<sup>[43]</sup>, 土地利用分类图和土壤植被图会提高土壤热通量的估算精度。

$$G = \frac{T_s}{\alpha} \cdot (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98NDVI^4) \cdot R_n \quad (10)$$

式中,  $T_s$  为地表温度,  $^\circ C$ 。

对于水体, Morse 等<sup>[34]</sup>于 2000 年在对美国爱达荷州熊河流域的实验中, 综合考虑时间、水体深浅及水质状况, 建立了 (11)~(16) 的经验公式。考虑到研究区水体更接近浑浊或浅的水体, 并结合刘朝顺<sup>[44]</sup>对山东省地表蒸散发的研究, 本文采用  $G_{water} = 0.5R_n$ 。

深且清澈的水体:

1—6 月

$$\text{瞬时: } G_{water} = 0.9R_n - 40 \quad (11)$$

$$24\text{h: } G_{water} = 0.9R_n - 50 \quad (12)$$

7—12 月

$$\text{瞬时: } G_{water} = R_n - 90 \quad (13)$$

$$24\text{h: } G_{water} = R_n - 100 \quad (14)$$

浅或浑浊的水体:

$$\text{瞬时: } G_{water} = 0.5R_n \quad (15)$$

$$24\text{h: } G_{water} = 0 \quad (16)$$

## 2.3 感热通量

感热通量  $H$  是指由于传导和对流作用从地表传输至大气中的能量, 它是由地表和空气之间的温度梯度造成的。

$$H = \rho \cdot C_p \cdot dT/r_{ah} \quad (17)$$

式中,  $\rho$  为空气密度,  $kg \cdot m^{-3}$ , 是大气压的函数;  $C_p$  为空气定压比热,  $1004 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $dT$  为近地表两个高度处 ( $Z_1$  和  $Z_2$ ) 的温差,  $K$ ;  $r_{ah}$  为两个高度处热量传输的空气动力学阻抗,  $s \cdot m^{-1}$ 。中性大气条件下, 空气动力学阻抗可以表达为

$$r_{ah} = \ln(Z_2/Z_1) \cdot (k \cdot \mu_s) \quad (18)$$

$$\mu_s = k \mu_z / \ln(Z_2/Z_{om}) \quad (19)$$

式中,  $Z_1$  和  $Z_2$  为植被零平面位移高度之上的两个高度 (一般

取  $0.01m$  和  $2m$ );  $\mu_s$  为摩擦风速,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $k$  为 Karman 常数 ( $0.41$ , 无量纲);  $\mu_z$  为高度  $Z_z$  处的风速,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $Z_{om}$  为地表动力粗糙度。

SEBAL 模型假设参考高度处的温度差  $dT$  与遥感反演的地表温度  $T_s$  之间存在一种线性关系:  $dT = aT_s + b$ , 并且影像上存在: “冷点”和“热点”, 以此作为边界条件求得每个像元的  $dT$ , 这是 SEBAL 估算  $H$  的创新之处, 其中冷点是指影像中水分供应充足、温度很低、处于潜在蒸散水平的像元, 热点是指位于很干燥的未种植任何植被的闲置农田的像元, 这个点可以被认为没有蒸散发生, 本文中冷点和热点分别选择于水体和干燥的裸地中。实际上白天大气状况一般处于非中性条件,  $r_{ah}$  受大气稳定度影响很大, 模型采用 Monin-Obukhov 相似性理论通过循环迭代对  $\mu_s$  和  $r_{ah}$  进行修正, 直至  $r_{ah}$  的值稳定为止。

综上所述, 首先求得中性大气条件下各像元的  $\mu_{s1}$ 、 $r_{ah1}$ , 通过冷热点选取, 获得第一组  $a_1$ 、 $b_1$  值及  $dT_1$ , 进而求得  $H_1$ , 通过 Monin-Obukhov 长度  $L$  判断大气稳定度, 利用稳定度修正函数分别对非中性大气条件下各像元的  $\mu_{s2}$ 、 $r_{ah2}$  进行修正, 判断  $r_{ahcold}$ 、 $r_{ahhot}$  是否稳定, 不稳定则通过第二组  $a_2$ 、 $b_2$  值及  $dT_2$  求得  $H_2$ , 以此类推, 直到  $r_{ahcold}$ 、 $r_{ahhot}$  稳定结束迭代, 一般需要经过 5—8 次迭代。

## 2.4 潜热通量、瞬时蒸散发

潜热通量 ( $\lambda ET$ ) 指下垫面与大气间水分的热交换, 即地表吸收辐射能与蒸发耗热的热交换, 包括地面蒸发或植被蒸腾、蒸发的能量, 又称蒸散。

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (20)$$

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (21)$$

式中,  $ET_{inst}$  为瞬时蒸散发,  $mm \cdot h^{-1}$ 。

## 2.5 时间尺度扩展

瞬时蒸散发不能满足研究要求, 需扩展到日蒸散发。蒸发比定义为潜热通量与地表可利用能量的比值。蒸发比在 1d 内可被认为是一个常数<sup>[45]</sup>, 即日蒸发比等于遥感获得的瞬时蒸发比, 进而求得日蒸散发<sup>[35]</sup>:

$$A_{inst} = \frac{\lambda ET}{R_n - G} = A_{24} \quad (22)$$

$$ET_{24} = \frac{86400 A_{24} (R_{n24} - G_{24})}{\lambda} \quad (23)$$

$$R_{n24} = (1 - \alpha) R_{24} \tau_{sw} - 110 \tau_{sw} \quad (24)$$

$$R_{24} = \frac{G_{sc}}{\pi d_r} (\omega_s \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \sin w_s) \quad (25)$$

$$d_r = 1 + 0.0167 \sin \left[ \frac{2\pi (J - 93.5)}{365} \right] \quad (26)$$

$$w_s = \arccos(-\tan\phi \tan\delta) \quad (27)$$

$$\delta = 0.409 \sin \left( \frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right) \quad (28)$$

式中,  $A_{inst}$  为瞬时蒸发比;  $A_{24}$  为日蒸发比;  $\lambda$  为气化潜热;  $ET_{24}$  为日蒸散发;  $R_{n24}$  为日净辐射<sup>[46]</sup>;  $G_{24}$  是日土壤热通量, 为 0;  $d_r$

是日地距离; $J$ 是影像获取日期在太阳历中的排列序号; $\Phi$ 是像元的地理纬度(弧度表示); $\delta$ 是太阳纬度。

### 3 结果与分析

#### 3.1 蒸散发数量特征及空间分布特征

蒸散发的大小与太阳辐射、气温、相对湿度、风速等气象因子有关,夏季太阳日照时数长、温度高、相对湿度低等都是有利于蒸散的条件,因此6月份蒸散量相对较高。从空间分布上看,蒸散发的空间分异特征比较显著,高值区主要分布在东部的国家级自然保护区、北部的河口区的大部分盐田和养殖池、中部东营市区周边的平原水库集中分布区以及南部广饶县的优质农田区域,如图2(a)。

从数量上看,2009年6月4日蒸散量在0.05—9.11mm之间,平均值为5.31mm。图2(b)显示,研究区日蒸散量的频率图有3个波峰,分别位于3.85、6.57和7.91mm,高度由左向右依次递减,其中蒸散量接近第一波峰、值域在3.0—5.0mm的区域占总体面积的50.4%,蒸散量在8mm以上的区域仅占5.24%。

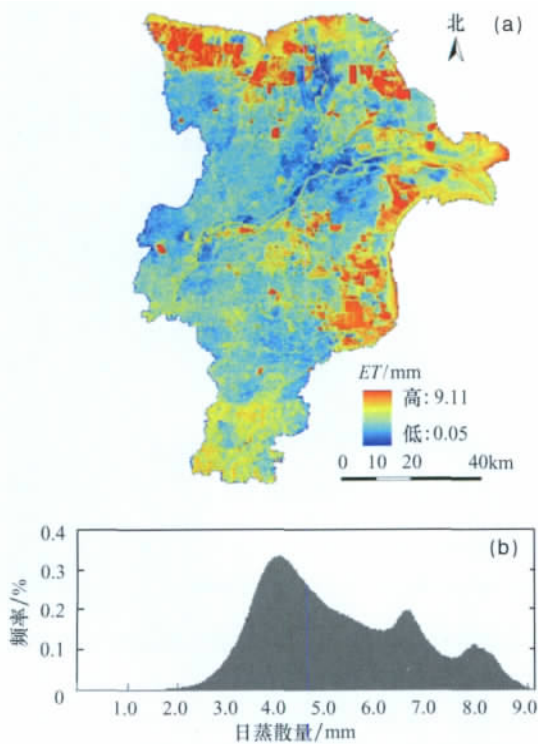


图2 2009年6月4日东营市日蒸散发空间分布图(a)和频率分布图(b)  
Fig. 2 Daily ET distribution of Dongying (a) and its frequency distribution (b) on June 4, 2009

#### 3.2 不同土地利用类型的蒸散发数量特征及空间分布特征

根据研究区土地利用和覆被特点将研究区分为水体、耕地、林草地、苇地、建设用地、滩涂和未利用地7种类型,其中,水体包括养殖池、盐田、水库、河渠等,耕地包括旱地、水田,未利用地包括裸地、盐碱地(图3)。

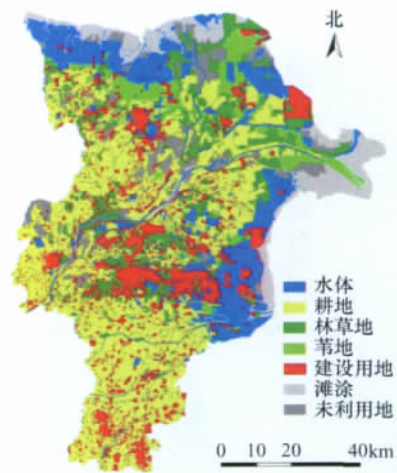


图3 2009年东营市土地利用图

Fig. 3 Land utilization map of Dongying in the year of 2009

不同土地利用类型具有不同下垫面理化特性,如对辐射能量的吸收能力、土壤水分含量、植被状况等的差异,因而蒸散发能力也有所不同,其日蒸散发量均值柱状图如图4(a)所示,它代表了各类型所有像元蒸散的整体水平,由大至小依次为:水体>滩涂>苇地>林草地>耕地>建设用地>未利用地。

水体日蒸散发量集中在7.5—8.5mm,值域在2.5—9.1mm之间,区域蒸散量的最高值来自水体。东营市鼓励水产养殖业和盐业的适度开发利用,水体的低值区主要是由养殖池、混杂有部分细碎建设用地以及裸露盐堆的盐田构成,它们会在一定程度上拉低水体蒸散量;而混有芦苇等水生植物的水体蒸散量最高,是水体蒸发和植被蒸腾两部分的和。

耕地是研究区分布最广泛的土地利用类型,由频率图的两个波峰可知,耕地总体上呈现两种不同的蒸散发水平,日蒸散发量在3.4—4.5mm之间的低值像元占耕地总量的51.0%。研究区南部的广饶县土地类型以耕地为主,是全市粮棉菜的高产区,农作物以冬小麦为主,灌溉条件较好,蒸散量大都在6mm以上。水田数量少但蒸散量高(7mm左右),主要分布于垦利县。灌溉条件差的耕地、盐碱化程度较高的棉田区和部分荒地蒸散量较小,散布于研究区的不同位置。

林草地频率图较为规则,60%的区域蒸散量在4—6mm之间,蒸散量较高和较低的区域面积非常小,总和仅为6.64%。林地主要分布于东部的黄河三角洲国家级自然保护区境内,以天然柳林和人工刺槐林为主要植被类型。草地大多生长在研究区的北部,植被覆盖度低,土地含水量少,蒸散量相对较低。

芦苇是一种生命力较强的耐盐碱植物,广泛分布于研究区北部及东部。大于7mm的像元主要对应河口区北部沾化县的造纸原料厂(大片人工管护良好、水分充足、长势旺盛的芦苇)和现黄河入海口处的保护区内(自然条件优越,大片长势良好的芦苇),研究区北部黄河故道周边的自然保护区蒸散发量相对略低,在4mm以上。6月4日芦苇处于生长期,蒸腾作用需要消耗大量水分,水分充足的芦苇区域还包括水面的蒸

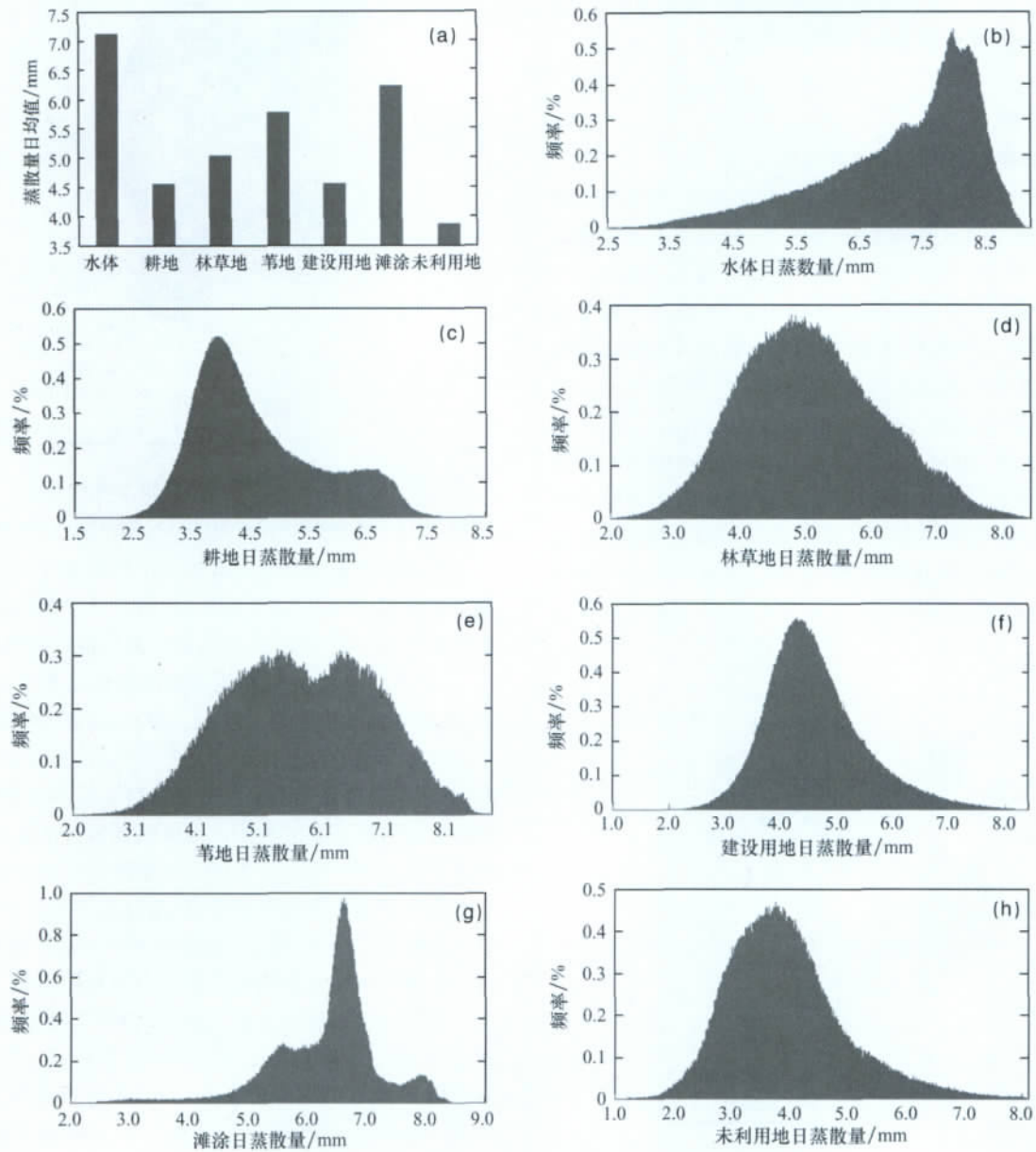


图 4 各土地利用类型均值及日蒸散量频率分布

Fig. 4 Mean and frequency distribution of daily ET for seven kinds of land utilization

发,蒸散相对较高,而水分缺乏的芦苇植株矮小,蒸散较弱。

建设用地的频率分布图最为集中,以 4.2mm 为峰值,约 91.5% 的区域蒸散量在 3—6mm 之间。建设用地下垫面大多为非渗透表面,水分在蒸发过程中受阻,蒸散量一般较小,然而,城市中散布的大量小型人工水体、绿化植被等都有较高的蒸散发量,它们对调节城市温度、改善城市环境有积极作用,同时也使得建设用地的蒸散量在一定程度上被抬高。

滩涂日蒸散发量总体分布范围在 2.0—9.0mm 之间,而其中 71.8% 的区域蒸散量在 6mm 以上,蒸散能力较高。东营市东、北临渤海,黄河由此入海,滩涂资源丰富,海滩、河滩分别沿海岸线、黄河呈带状分布。低蒸散量的滩涂主要分布于黄河两岸,近年来黄河来水量减少,水资源缺乏是造成河滩蒸散发量较低的原因。潮滩沉积物的差异及海水含量的不同使

海滩有明显的分带现象,蒸散发量也由陆向海方向呈现带状梯度增加的趋势。

未利用地与建设用地的频率图较为相似,蒸散发量整体偏低。研究区土壤盐渍化现象普遍,盐碱地在河口区和垦利县分布最多,其蒸散发主要是土壤水分蒸发,数值较小。

随着日蒸散发量由低到高,水体、滩涂、苇地所占比例逐渐增加,而未利用地逐渐减少;耕地的蒸散发呈两种水平,高值区主要为优质小麦种植区,低值区为盐碱化程度较高的棉田区;蒸散发低值区以建设用地和未利用地为主,高值区以水体和滩涂为主。综上可知,土地利用类型决定了蒸散量的高低,同时土地利用类型的空间分布也决定了蒸散发的空间格局差异;而蒸散发同时也能够很好地反映下垫面的物理特性和空间差异,两者有着密切的联系。



### 3.3 结果验证

由于缺乏地面实测的蒸散发数据,本文对比其他学者在本区域的研究结果进行分析,其蒸散发高值区的空间分布与潘志强<sup>[25]</sup>、张长春<sup>[26]</sup>、崔亚莉<sup>[47]</sup>、奚歌<sup>[48]</sup>等学者的结论相一致。潘志强指出,蒸散量的最高值出现在各种水面上,冬小麦蒸散量受灌溉条件影响,其蒸散发有2个相对集中区域,与本研究中耕地蒸散量频率图的2个波峰相对应。此外,本研究还结合气象数据,采用FAO-56 P-M公式计算的芦苇的实际蒸散发对模型模拟精度进行了验证。野外气象测量点位于河口区北部的芦苇区内,此处水分充足,芦苇约1.2m高,遥感估算的蒸散发量为7.15mm。气象数据计算得到的参考作物蒸散量为6.83mm,参考FAO推荐的作物系数表,确定芦苇沼泽在生长中期的作物系数为1.2<sup>[49]</sup>,两者相乘得到芦苇实际蒸散量为8.20mm,与遥感模拟的相对误差为12.8%,表明遥感模拟的结果基本合理。基于单点的间接验证受多因素影像,对SEBAL模型结果的精确验证需要大量的实测数据支持,故今后还需进一步改进完善。

## 4 讨论与结论

遥感技术能够直接获取大面积非均匀下垫面的理化特征,使得遥感估算蒸散发比传统单点测量的方法更具代表性。应用SEBAL模型和TM数据估算黄河三角洲2009年6月4日的蒸散发,日值范围在0.05—9.11mm之间,均值为5.31mm。蒸散发量以北部和东部的滨海滩涂、东部自然保护区的林草地和苇地、中部的的水田及平原水库、南部广饶县灌溉农田区域较高。结果表明研究区蒸散发的空间分异特征明显,受不同下垫面状况的影响显著。

研究区淡水资源紧缺,而蒸散发是水分损失的重要途径,应根据不同下垫面的蒸发量大小及分布特征,科学配置水资源,特别是南北蒸散发水平差异较大的耕地类型,更宜制定合理的灌溉计划,提高水资源的利用效率。

在定量遥感中,验证是重要的环节。在黄河三角洲蒸散发研究中,未能找到相关的实测数据,因此通过与前人在本区域的研究结果对比,并基于气象数据采用FAO-56 P-M公式计算的芦苇实际蒸散发作为间接验证手段,补充和完善地面实测数据将是下一步工作的重点。应用土地利用数据对日蒸散发的空间格局特征进行定量分析时,研究尺度和制图综合因素对分析结果有一定的影响。单日蒸散发量的估算结果能够反映研究区不同土地利用类型的蒸散发规律,而蒸散发对土地利用变化、气候变化的响应特征需要更长时间序列的研究。未来将考虑增加研究天数,对蒸散发的时空特征进行综合分析。

### 参考文献 (References)

- [1] 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.  
Li Hongjun, Lei Yuping, Zheng Li, et al. Remote Sensing Technology

and Application, 2005, 20(3): 321-325.

- [2] 王国华,赵文智. 遥感技术估算干旱区蒸散发研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(8): 848-858.  
Wang Guohua, Zhao Wenzhi. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(8): 848-858.
- [3] 鱼腾飞,冯起,司建华,等. 遥感结合地面观测估算陆地生态系统蒸散发研究综述[J]. 地球科学进展, 2011, 26(12): 1260-1268.  
Yu Tengfei, Feng Qi, Si Jianhua, et al. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(12): 1260-1268.
- [4] 高彦春,龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展[J]. 遥感学报, 2008, 12(3): 515-528.  
Gao Yanchun, Long Di. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(3): 515-528.
- [5] 郑有飞,陈鹏,吴荣军,等. 地表蒸散的遥感估算模型及其在农业干旱监测中的应用[J]. 生态学杂志, 2011, 30(4): 837-844.  
Zheng Youfei, Chen Peng, Wu Rongjun, et al. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(4): 837-844.
- [6] Choudhury B J. Global pattern of potential evaporation calculated from the Penman-Monteith equation using satellite and assimilated data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 61(1): 64-81.
- [7] Bouchet R. Evapotranspiration réelle et potentielle: signification climatique[J]. *International Association of Hydrological Sciences*, 1963, 62: 134-142.
- [8] Sun R, Gao X, Liu C M, et al. Evapotranspiration estimation in the Yellow River Basin, China using integrated NDVI data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(13): 2523-2534.
- [9] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(5): 940-948.
- [10] Roerink G, Su Z, Menenti M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 2000, 25(2): 147-157.
- [11] Su Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6(1): 85-100.
- [12] 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, 213(1-4): 198-212.
- [13] 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, 213(1-4): 213-229.
- [14] Allen R, Irmak A, Trezza R, et al. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(26): 4011-4027.
- [15] 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.
- [16] Norman J M, Kustas W P, Humes K S. Source approach for estimating soil and vegetation energy flux in observations of directional radiometric surface temperature[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1995, 77(3-4): 263-293.
- [17] Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, et al. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing 1. Model formulation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D10): 117-129.
- [18] Li Z L, Tang R L, Wan Z M, et al. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data[J]. *Sensors*, 2009, 9(5): 3801-3853.

- [19] Tang R L, Li Z L, Tang B H. An application of the Ts-VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 540-551.
- [20] 何延波, Su Z, Jia L, 等. 遥感数据支持下不同地表覆盖的区域蒸散 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 288-296.  
He Yanbo, Su Z, Jia L, *et al.* *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(2): 288-296.
- [21] 李宝富, 陈亚宁, 李卫红, 等. 基于遥感和 SEBAL 模型的塔里木河干流区蒸散发估算 [J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1230-1238.  
Li Baofu, Chen Yaning, Li Weihong, *et al.* *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1230-1238.
- [22] Mutiga J K, Su Z, Woldai T. Using satellite remote sensing to assess evapotranspiration: Case study of the upper Ewaso Ng'iro North Basin, Kenya [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, 12(S1): S100-S108.
- [23] 杨红娟, 丛振涛, 雷志栋. 谐波法与双源模型耦合估算土壤热通量和地表蒸散发 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2009, 34(6): 706-710.  
Yang Hongjuan, Cong Zhenhao, Lei Zhidong. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(6): 706-710.
- [24] Pipunic R, Walker J, Western A. Assimilation of remotely sensed data for improved latent and sensible heat flux prediction: A comparative synthetic study [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112 (4): 1295-1305.
- [25] 潘志强, 刘高焕. 黄河三角洲蒸散的遥感研究 [J]. *地球信息科学*, 2003, 5(3): 91-96.  
Pan Zhiqiang, Liu Gaohuan. *Geo-information Science*, 2003, 5 (3): 91-96.
- [26] 张长春, 王晓燕, 邵景力. 利用 NOAA 数据估算黄河三角洲区域蒸散量 [J]. *资源科学*, 2005, 27(1): 86-91.  
Zhang Changchun, Wang Xiaoyan, Shao Jingli. *Resources Science*, 2005, 27(1): 86-91.
- [27] 李发鹏, 徐宗学, 李景玉. 基于 MODIS 数据的黄河三角洲区域蒸散发量时空分布特征 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 113-120.  
Li Fapeng, Xu Zongxue, Li Jingyu. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25 (2): 113-120.
- [28] 刘朝顺, 高志强, 高伟. 基于遥感的蒸散发及地表温度对 LUCC 响应的研究 [J]. *农业工程学报*, 2007, 23(8): 1-8.  
Liu Chaoshun, Gao Zhiqiang, Gao Wei. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(8): 1-8.
- [29] Jia L, Xi G, Liu S, *et al.* Regional estimation of daily to annual regional evapotranspiration with MODIS data in the Yellow River Delta wetland [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(10): 1775-1787.
- [30] 刘振乾, 吕宪国, 刘红玉. 黄河三角洲和辽河三角洲湿地资源的比较研究 [J]. *资源科学*, 2000, 22(3): 60-65.  
Liu Zhenqian, Lu Xianguo, Liu Hongyu. *Resources Science*, 2000, 22 (3): 60-65.
- [31] Ramos J G, Cratchley C R, Kay J A, *et al.* Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using ground-meteorological data available for the flumen district into the Ebro Valley of NE Spain [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(4): 638-652.
- [32] Singh R K, Irmak A, Irmak S, *et al.* Application of SEBAL model for mapping evapotranspiration and estimating surface energy fluxes in south-central Nebraska [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce*, 2008, 134(3): 273-285.
- [33] Gao Y, Long D, Li Z. Estimation of daily actual evapotranspiration from remotely sensed data under complex terrain over the upper Chao river basin in North China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(11): 3295-3315.
- [34] Morse A, Tasumi, M. Application of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and streamflow depletion in the Bear River Basin of Idaho through remote sensing: Final report [R]. USA: Idaho Department of Water Resources-University of Idaho, 2000.
- [35] 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): 255-263.  
Zeng Lihong, Song Kaishan, Zhang Bai, *et al.* *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(3): 255-263.
- [36] Waters R, Allen R, Tasumi M, *et al.* SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land)—Advanced training and users manual [R]. USA: The Idaho Department of Water Resources, 2002.
- [37] Tasumi M, Trezza R, Allen R, *et al.* US Validation Tests on the SEBAL Model for Evapotranspiration via Satellite [C]//Proceedings of the ICID Workshop on Remote Sensing of Evapotranspiration for Large Regions. Montpellier, France, 2003.
- [38] Van De Griend A, Owe M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(6): 1119-1131.
- [39] Jimenez-Munoz J C, Sobrino J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2003, 108, doi:10.1029/2003JD003480.
- [40] 覃志豪, Minghua Z, 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.  
Qin Zhihao, Zhang Minghua, Aron Karnieli, *et al.* *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 456-466.
- [41] Wukelic G E, Gibbons D E, Martucci L M, *et al.* Radiometric calibration of landsat thematic mapper thermal band [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 28: 339-347.
- [42] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
Zhao Yingshi. Principles and methods of remote sensing analysis application [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [43] Bastiaanssen W G M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 229 (1-2): 87-100.
- [44] 刘朝顺. 区域尺度地表水热的遥感模拟及应用研究——以山东省为例 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.  
Liu Chaoshun. Regional land surface water/heat flux modeling and application based on remote sensing in Shandong province [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2008.
- [45] Su Z, Wen J, Wen L. A methodology for the retrieval of land physical parameter and actual evaporation using NOAA/AVHRR data [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2003, 33(1): 106-118.
- [46] De Bruin H A R. From Penman to Makkink [C]//Proceedings and Information: TNO committee on Hydrological Research. The Netherlands, 1987, 39: 5-31.
- [47] 崔亚莉, 徐映雪, 邵景力, 等. 应用遥感方法研究黄河三角洲地表蒸散发及其与下垫面关系 [J]. *地学前缘*, 2005, 12(特刊): 159-165.  
Cui Yali, Xu Yingxue, Shao Jingli, *et al.* *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(Suppl): 159-165.
- [48] 奚歌, 刘绍民, 贾立. 黄河三角洲湿地蒸散量与典型植被的生态需水量 [J]. *生态学报*, 2008, 28(11): 5356-5369.  
Xi Ge, Liu Shaomin, Jia Li. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5356-5369.
- [49] Allen R G, Pereira L S, Raes D, *et al.* Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements [R]. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

(责任编辑 马骁骁)