

黄河三角洲湿地蒸散量与典型植被的生态需水量

奚 歌^{1,2}, 刘绍民^{1,*}, 贾 立^{1,3}

(1. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 2. 国家海洋信息中心, 天津 300171

3. Alterra, Wageningen University and Research Centre, 6700AA Wageningen, The Netherlands)

摘要: 蒸散量(ET)是黄河三角洲湿地水资源的主要消耗项, 包括植被蒸腾、水面蒸发以及裸土蒸发等。植被生态需水是为了保证植被生态系统能够健康维持并确保其生态服务功能得到正常发挥而必须消耗的一部分水量。准确地估算湿地蒸散量、研究植被生态需水量对于保护湿地生态环境是十分必要的。应用 MODIS 的地表反射率、地表温度数据与常规气象数据以及土地利用/覆盖图, 利用蒸散量的遥感估算模型 SEBS 模型估算了晴天条件下的黄河三角洲湿地日蒸散量, 采用 HANTS 算法插补了非晴天条件下的日蒸散量, 从而得到 2001~2005 年的该湿地年蒸散量的时间序列, 并对蒸散量进行验证和分析。结合该地区典型植被生态需水量与植被蒸散耗水量, 估算了 2001~2005 年的生态补水量。结果表明: 与实测值相比, 遥感估算月蒸散量的均方差 RMSD 为 16.4mm, 平均绝对百分比误差 MAPD 是 11.9%, 两者基本一致。黄河三角洲湿地的蒸散量在空间分布上以水体及周围地区、滨海滩涂、黄河故道以及黄河两岸沼泽湿地等的蒸散量较高, 居民地蒸散量较低。蒸散量的年际变化不大, 季节变化呈单峰型, 以 5、6、7 月份蒸散量最大, 月蒸散量在 110~120mm 之间。2001~2005 年期间, 每年至少有 40% 面积的芦苇沼泽和 60% 面积的芦苇草甸水分供应不足, 植被的正常生长受到影响, 尤其 2002 年较为严重, 2004 年以后情况有所改善。2002 年芦苇的生态补水量最大, 在 $9.9 \times 10^7 \sim 3.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间, 而 2004 年的生态补水量最小, 在 $3.0 \times 10^7 \sim 2.39 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间。

关键词: 黄河三角洲湿地; 蒸散量; 生态需水; 遥感

文章编号: 1000-0933(2008)11-5356-14 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Estimation of regional evapotranspiration and ecological water requirement of vegetation by remote sensing in the Yellow River Delta wetland

XI Ge^{1,2}, LIU Shao-Min^{1,*}, JIA Li^{1,3}

1 State key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 National Marine Data & Information Service, Tianjin 300171, China

3 Alterra, Wageningen University and Research Centre, 6700AA Wageningen, The Netherlands

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5356 ~ 5369.

Abstract: Evapotranspiration (ET) from the wetland of the Yellow River Delta (YRD) is one of the important components in the water cycle, which represents the water consumption by vegetation and evaporation from land surfaces such as the

基金项目: 中荷合作“黄河三角洲生态需水”资助项目; 国家自然科学基金资助项目(40671128); 国家高技术研究发展计划课题资助项目(2007AA12Z175); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2007CB714401)

收稿日期: 2008-03-10; **修订日期:** 2008-08-04

作者简介: 奚歌(1983~), 女, 辽宁昌图人, 硕士生, 主要从事水文气象遥感研究. E-mail: changtu2001@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: smliu@bnu.edu.cn

致谢: 感谢中国水利部黄河流域水资源保护局和中国科学院地理科学与资源研究所的刘高焕教授和黄种博士对本研究的支持; 同时非常感谢 Prof. Massimo Menenti 对本文的帮助

Foundation item: The project was financially supported by a Sino-Dutch cooperation project “the Yellow River Delta Environmental Flow Study”, the Project (No. 40671128) funded by the NSFC, the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2007AA12Z175) and the National Basic Research Program of China (No. 2007CB714401)

Received date: 2008-03-10; **Accepted date:** 2008-08-04

Biography: XI Ge, Master candidate, mainly engaged in hydrometeorology by remote sensing. E-mail: changtu2001@126.com

water and bare soil. Water shortage reduces photosynthesis and, therefore, the growth rate of vegetation. Healthy and abundant vegetation is necessary to protect the wetland ecosystem. Reliable estimates of the total amount of water required and of actual water consumption by the wetland are necessary to protect the YRD wetlands. In this study, the SEBS (Surface Energy Balance System) model based on the Energy Balance method was used to calculate daily ET using conventional meteorological data and instantaneous observations of land surface reflectance and temperature from MODIS when the data were available on clouds-free days. A detailed vegetation classification map was used to identify different vegetation types to parameterize surface roughness. An algorithm based on the Fourier transform was then applied to generate a time series of daily ET over a year period by filling the gaps in the calculated daily ET time series due to clouds. Annual ET between 2001 and 2005 was calculated after filling the gaps in the daily ET for each yearly data set. The estimated daily ET was validated by comparing the ET over open water bodies with the pan evaporation observations at meteorological stations. The error of estimate of the monthly ET was 16.4mm or 11.9%, which is comparable with the accuracy of ground measurements. The ecological water demand by *Phragmites australis* including *Phragmites australis*-swamp and *Phragmites australis*-meadow which is the dominant wetland vegetation and the amount of water supply to maintain *Phragmites australis* in a good growth condition, were evaluated for the period between 2001 and 2005. The ET in the areas around water bodies, by the sea shores and the Yellow River former channel and in the swamps near the banks of Yellow River shows higher values, while the ET in residential areas is rather low. The yearly ET over different wetland vegetation types shows varying values ranging between 671 mm and 1017 mm. The interannual variation of the total ET is not very significant. The highest monthly ET is observed in May, June and July, ranging between 110mm and 120mm. Most of *Phragmites australis* wetland was affected by water shortages, with evident impacts on growth, from 2001 to 2005. The situation in 2002 was the worst due to less precipitation while it was improved after 2004 since higher precipitation was observed in 2004. The amount of the required water supply in 2002 was the highest between 0.099 billion m^3 to 0.319 billion m^3 , while it was the lowest in 2004 between 0.03 billion m^3 to 0.239 billion m^3 .

Key Words: Yellow River Delta wetland; evapotranspiration; ecological water requirement; remote sensing

黄河在渤海湾与莱州湾之间汇入渤海,形成了我国温带最广阔、最完整和最年轻的黄河三角洲原生湿地生态系统。由于近年来黄河进入河口地区的水沙资源量减少、河道渠化、农业开发和城市化影响等原因,黄河口湿地生态系统出现了水资源严重失衡的状况,对其保护和恢复已迫在眉睫^[1]。水是湿地生态系统中最重要的一部分,对湿地的发育、演化和湿地生态系统结构与功能的维持起到关键的作用。水资源的合理开发利用成为目前该区域研究的重点和热点。

目前,国内外利用遥感技术估算蒸散的模型可以分为经验模型和基于地表能量平衡方程的模型:①经验模型,根据实际观测得到的局地通量与遥感反演的地表参数的拟合关系来计算区域地表通量^[2],如:植被指数-地表温度法;将遥感获得的数据应用于传统的计算蒸发散模型^[3~5](priestley-taylor 公式、互补相关模型、peman-monteith 方程等)中来估算区域蒸散量。②能量平衡模型^[6~8],在不考虑由平流引起的水平能量传输的情况下,地表单位面积的垂直方向的能量收支形式主要包括:显热通量、潜热通量、土壤热通量等。通过遥感技术可计算净辐射、土壤热通量和显热通量,然后利用能量平衡方程推算出蒸散量。能量平衡方法是目前运用比较多,发展也比较快的模型。根据能量平衡模型对下垫面状况的不同描述可以分为一层模型和双层模型。地表能量平衡系统模型(SEBS)是目前应用比较广泛的单层能量平衡模型^[9~13],在国内的黄淮海平原^[14,15]、陇西黄土高原^[16]、吉林^[17]、黄河三角洲^[18,19]等许多地区得到了验证和应用。遥感估算的蒸散量是指湿地植被实际消耗的水量,而湿地植被生态需水量是植被能够健康生长、发育或植被生态系统健康维持并确保其生态服务功能得到正常发挥所需要消耗的水量。利用遥感技术可以估算大面积区域尺度上的蒸散量,并结合湿地植被生态需水量,可以实时地监测大面积湿地植被的缺水状况及缺水区域的分布,对于湿地水资

源的分配十分重要。

本文拟通过遥感技术,利用 SEBS 模型,并结合 MODIS 遥感产品和气象资料来估算黄河三角洲湿地蒸散量,对黄河三角洲湿地蒸散量的时空分布特征、湿地典型植被生态补水量及植被生态系统的水分亏缺情况进行了研究,其方法与结果将对该地区湿地生态保护和恢复、湿地水文调节与管理具有一定的指导意义。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域

黄河三角洲湿地位于中国山东省北部莱州湾和渤海湾之间,其范围大致界于东经 118°10′至 119°15′,北纬 37°15′至 38°10′之间,行政区划为东营、河口两区和广饶、利津、垦利三县。该地区属温暖带半湿润半干旱大陆性季风气候,受季风影响显著,典型的降水季节在 6、7、8 月份。现代黄河三角洲以渔洼为顶点,北起挑河口,南至宋春荣沟的扇形地带,覆盖着各种湿地植被、旱地作物等。

1.2 数据

1.2.1 MODIS 数据

地表温度、地表反照率和植被覆盖率是决定地表与大气的水热交换以及土壤和植被对可利用能量分割的 3 个非常重要的参数。本文使用了 MODIS 的标准数据产品,如表 1 所示,可直接从 MODIS 数据网站(<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome>)上获得。其中 MOD09A1 产品提供 7 个波段且空间分辨率不同的单波段反射率。本文首先使用 ModisTool 软件重新采样到 1000m 空间分辨率的反射率数据,然后根据 Liang^[20]提出的方法将窄波段反射率转换为宽波段地表反照率。NDVI 由波段 1 和 2 的单波段反射率计算得到。地表温度和叶面积指数 LAI 为 MODIS 的直接产品。

表 1 MODIS 标准数据产品
Table 1 MODIS standard products

MODIS 标准产品 MODIS standard products	地表参数 Land surface parameters	空间分辨率 Spatial resolution	时间分辨率(d) Temporal resolution
MOD09A1	地表反射率 Land surface reflectance	第 1、2 波段为 250 m Bands 1 ~ 2 ; 250 m	8
	植被指数 NDVI Normalized vegetation index	第 3 ~ 7 波段为 500 m Bands 3 ~ 7 ; 500 m	
MOD11A1	地表温度 Land surface temperature	1000	1
MOD15A2	叶面积指数 LAI Leaf area index	1000	8

植被覆盖率 f 由 LAI 计算得到:

$$f = 1 - e^{-k \cdot LAI} \quad (1)$$

式中, k 为消光系数。利用 SAIL 模型及芦苇的叶倾角分布类型,对芦苇植被 $k = 0.98$,其它植被类型取 $k = 0.5$ 。

1.2.2 气象数据

本文使用了 2001 ~ 2005 年东营站的气温、风速、降水量、E601 蒸发皿的蒸发量等气象数据。

1.2.3 土地利用/覆盖图

土地利用/覆盖类型图^①(图 1)是在进行了广泛的野外调查之后,利用 2005 年 9 月 7 日高分辨率的 SPOT 遥感影像(像元为 2.5m × 2.5m)进行分类而成的。黄河三角洲湿地的植被类型主要分成 7 种:芦苇(*Phragmites australis*)沼泽、芦苇草甸、柽柳灌丛、翅碱蓬、刺槐林、柽柳-翅碱蓬群落、旱地作物。其它土地利用/覆盖类型包括:滩涂、裸地、盐碱地、内陆水体(黄河、水库、湖泊等)、虾池、盐田、居民地及人工用地。

① 土地利用/覆盖类型图由中国科学院地理科学与资源研究所刘高焕研究员、黄骞博士提供

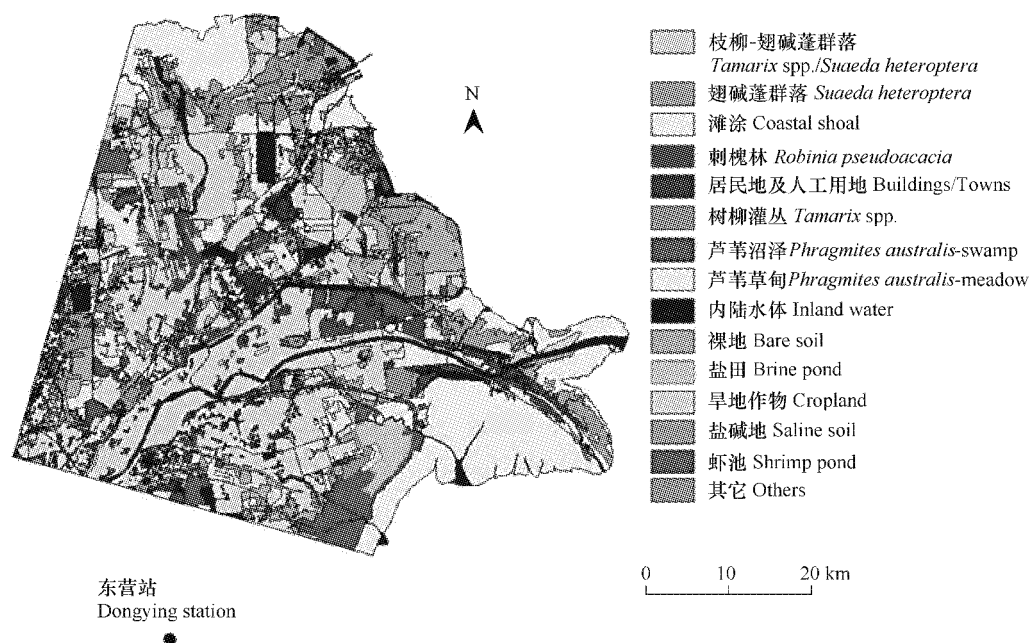


图1 黄河三角洲土地利用/覆盖类型图

Fig. 1 Land use/cover classification map of the YRD wetland

2 模型与方法

2.1 SEBS 模型

在 SEBS 模型中,地表能量平衡方程表示为:

$$R_n = G + H + LE \quad (2)$$

式中, R_n 为净辐射通量; G 为土壤热通量; H 为显热通量; LE 为潜热通量。有关模型的详细介绍可参考文献^[11], 本文只描述主要原理, 并侧重在黄河三角洲研究中的相关参数化方案。

2.1.1 净辐射

净辐射为地表向下短波、长波辐射与向上短波、长波辐射的差值, 为:

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot \frac{I_0 \cdot \tau \cdot \cos\theta}{R^2} + \varepsilon_a \sigma T_a^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (3)$$

式中, α 为地表反照率; I_0 为太阳常数; τ 为短波大气透过率; θ 为太阳天顶角; $1/R^2$ 为日地距离订正因子; ε_a 为空气比辐射率; ε_s 为地表比辐射率; T_a 为气温; T_s 为地表温度; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数。

2.1.2 土壤热通量

土壤热通量是土壤或水体的热交换能量。一般通过它与净辐射及植被覆盖的关系来确定, 表示为^[10]:

$$G = R_n [\Gamma_c + (1 - f)(\Gamma_s - \Gamma_c)] \quad (4)$$

式中, 全植被覆盖下, 土壤热通量与净辐射的比值 $\Gamma_c = 0.05$; 裸地情况下, 土壤热通量与净辐射比值 $\Gamma_s = 0.315$; f 为植被覆盖率。在本文中, 水体土壤热通量与净辐射的比值取 0.5 ^[21]。

2.1.3 显热通量

显热通量是在已知大气状况和地表状况下利用莫宁-奥布霍夫相似理论计算得到。大气状况的描述包括参考高度处的风速、气温和湿度。描述地表状况的参数有地表或冠层的动量粗糙度、热量粗糙度和地表温度。根据近地层通量廓线关系:

$$u = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z - d_0}{z_{0m}} \right) - \Psi_m \left(\frac{z - d_0}{L} \right) - \Psi_m \left(\frac{z_{0m}}{L} \right) \right] \quad (5)$$

$$\theta_0 - \theta_a = \frac{H}{k u_* \rho C_p} \left[\ln \left(\frac{z - d_0}{z_{0h}} \right) - \Psi_h \left(\frac{z - d_0}{L} \right) - \Psi_h \left(\frac{z_{0m}}{L} \right) \right] \quad (6)$$

$$L = - \frac{\rho C_p u_*^3 \theta_v}{kgH} \quad (7)$$

式中, z 是参考高度; u 是风速; u_* 是摩擦风速; d_0 是零平面位移高度; z_{0m} 是动力学粗糙度; z_{0h} 是热力学粗糙度; Ψ_m 和 Ψ_h 分别是动量和热量传输的稳定度订正函数。 θ_0 和 θ_a 分别是地表和参考高度的虚温; L 是莫宁-奥布霍夫长度; H 是显热通量; k 是卡曼常数; ρ 是空气密度; C_p 是气体常数; g 是重力加速度; θ_v 为近地表虚位温。

根据土地利用/覆盖图, 本文针对不同土地利用类型, 对动力学粗糙度的计算采用了不同的参数化方案。

对于植被冠层, z_{0m} 采用 (8) ~ (10) 式^[14,22]:

$$d_0 = h_v [\ln(1 + x^{\frac{1}{6}}) + 0.03 \ln(1 + x^6)] \quad (8)$$

$$z_{0m} = \begin{cases} h_s + 0.28 h_v x^{\frac{1}{2}} & (0 \leq x \leq 0.2) \\ 0.3 h \left(1 - \frac{d_0}{h_v} \right) & (0.2 \leq x \leq 0.4) \end{cases} \quad (9)$$

$$x = 0.2 \cdot LAI \quad (10)$$

式中, h_v 为植被高度, 通过土地利用/覆盖图和各种植被类型的生长周期估计出植被的高度, 从而得出植被高度图; h_s 为土壤表面粗糙度, 取值范围为 0.005 ~ 0.02。另外, 对于林地, $z_{0m} = 0.5$; 对于居民地, $z_{0m} = 0.5$ ^[23]。

热力学粗糙度 z_{0h} 受下垫面动力学和热力学特性、近地层空气及其与地表相互作用所决定。Owen^[24] 提出了一个地表参数 B^{-1} (stanton 数的倒数), 该参数将 z_{0h} 和 z_{0m} 联系了起来,

$$kB^{-1} = \ln \left(\frac{z_{0m}}{z_{0h}} \right) \quad (11)$$

SEBS 中计算 kB^{-1} 采用如下参数化方案^[11]:

$$kB^{-1} = \frac{kC_d}{4C_t \frac{u_*}{u(h_v)} (1 - e^{-n_{ec}^2})} f_c^2 + \frac{k \cdot u_* / u(h_v) \cdot z_{0m} / h_v \cdot f_c^2 f_s^2 + kB_s^{-1} f_s^2}{C_t^*} \quad (12)$$

式中, f 为植被覆盖率, f_s 等于 $1 - f$; C_d 为叶片的拖曳系数 (本文中取 0.2); C_t 为叶片热传输系数 (本文中取 0.01); $u(h_v)$ 为冠层高度处的水平风速; n_{ec} 为冠层内风速廓线衰减系数; C_t^* 为土壤的热传输系数; kB_s^{-1} 是土壤的 kB^{-1} 值。

根据土地利用/覆盖图, 对于植被覆盖和裸地区域, 可根据式 (11, 12) 来计算热力学粗糙度。对于水体, $z_{0h} = 0.169 \exp(-1.53 u_*^{0.25})$ ^[25]。

2.1.4 潜热通量

SEBS 模型采用地表能量平衡指数法来确定蒸发比^[9]进而获得地表潜热通量,

$$LE = \Lambda \cdot (R_n - G) \quad (13)$$

2.2 日蒸散量的估算

通过上述计算可以得到瞬时蒸散量, 但实际应用中需要的是长时间段的蒸散量, 如日、旬、月等。本文假设: 显热通量和潜热通量在一天之中会变化, 但蒸发比在一天中近似不变^[26], 即可以近似地认为日平均蒸发比等于卫星过境时刻的瞬时蒸发比。日蒸散量可表示为:

$$ET_{daily} = 8.64 \times 10^7 \times \Lambda \times (R_{ndaily} - G_{daily}) / (\lambda \rho_w) \text{ (mm)} \quad (14)$$

式中, R_{ndaily} 为日净辐射; G_{daily} 为日土壤热通量; ρ_w 为水密度 (1.0 g/cm^3); λ 为水的汽化热量, 取值为 $2.47 \times 10^6 \text{ J/kg}$ 。在晴天条件下, 日土壤热通量可忽略不计。日净辐射为:

$$R_{\text{ndaily}} = (1 - \alpha) K_{24}^{\downarrow} + L_{24} \quad (15)$$

式中, α 为地表反照率; $K_{24}^{\downarrow}$ 为日太阳总辐射; L_{24} 为日净长波辐射。日太阳总辐射和日净长波辐射可参考 Su 等^[13] 提出的有关方法。

2.3 年蒸散量的估算

利用遥感估算蒸散量的方法经常遇到云的问题, 因此也减少了用来估算年蒸散量的可利用遥感影像的数量。由于云的影响而缺少天的蒸散量, 可采用时间序列分析方法 HANTS^[27] 基于一定数量晴天数据插补出来。

HANTS(harmonic analysis of times series)是在傅立叶变换基础上改进的一种时间序列分析方法。它是根据谐波的余弦分解, 将图像信息分解成幅值信息和相位信息进行分析。这种时间序列分析方法允许数据在时间序列上不等间距, 以及允许使用者选择周期性函数的频率去模拟观测的时间序列数据。因此, 该方法在一定程度上可以反映由于气象和地表水分等状况引起的蒸散量变化^[27]。

HANTS 算法相对于快速傅立叶变换更具有灵活性, 可以根据权重矩阵排除一些无效的数据样本, 从而得出比较可靠的插补数据。以 2005 年数据为例, 晴天影像有 153d。首先运用 SEBS 模型计算出这 153d 的日蒸散量作为基础, 然后根据 HANTS 方法计算出全年蒸散量的时间序列。

2.4 遥感估算蒸散量的验证方法

由于缺乏实地的蒸散量观测资料, 本文对遥感估算的蒸散量的验证分析是根据气象站蒸发皿观测的蒸发量数据来实现。首先根据土地利用/覆盖图选出代表该地区水体(如: 水库、湖泊、黄河、坑塘等)像元, 从而得出遥感估算的水体像元蒸发量。

1972 年 9 月世界气象组织蒸发工作组在日内瓦会议上做出决定: 认为 20m²蒸发池研究湖泊等天然水体的蒸发量, 可以得出满意结果^[28]。由于实际的天然水体蒸发难以测定, 一般常用 20m²蒸发池蒸发量来代替自然水体的蒸发量。通常气象站利用 E601 或者 20cm 蒸发皿观测蒸发量, 需根据观测值与折算系数推算出水体的蒸发量。其中, 20m²蒸发池的蒸发量与 E601 型蒸发皿的折算系数表达式为:

$$c_w = E_{20m^2} / E_{601} \quad (16)$$

式中, c_w 为 20m²蒸发池与 E601 型蒸发皿蒸发量的折算系数; E_{20m^2} 为 20m²蒸发池的蒸发量; E_{601} 为 E601 型蒸发皿的蒸散量。黄河三角洲地区 1、2、12 月份为冰期, 所以只考虑 3~11 月份的情况。表 3 所示为 20m²蒸发池与 E601 型蒸发皿测量的蒸发量值在当地的多年平均月折算系数^[28]。

表 3 20m²蒸发池与 E601 型蒸发皿平均月折算系数^[28]

	3 月 Mar.	4 月 Apr.	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 Aug.	9 月 Sep.	10 月 Oct.	11 月 Nov.	3~11 月平均 Average
折算系数 Conversion coefficient	0.93	0.89	0.92	0.94	1.00	1.04	1.08	1.05	1.08	0.99

2.5 湿地植被生态需水量及补水量的计算方法

湿地生态需水量从狭义上来讲是指湿地每年用于生态消耗而需要补充的水量^[29]。生态耗水量是在现状情况下生态系统所使用 and 消耗的水量。生态需水与生态耗水间存在一种互动关系(图 2), 生态需水 = 生态耗水 + 生态补水, 生态补水量的大小决定了生态需水的满足程度, 也决定了生态系统的健康程度。湿地植被是湿地生态系统的重要组成部分, 也是湿地水资源主要的消耗群体。植被的生态耗水量即为蒸散耗水量。对于湿地植被而言, 植被需水量满足程度可用实际蒸散量与植被生长状况所对应植被需水量之间的差异来反映。

本文对于芦苇生态需水量的计算采用杨志峰^[29] 等给出的芦苇生态需水量级别, 如表 4 所示。根据黄河三角洲地区湿地芦苇生态需水量的基本标准及遥感估算的实际蒸散耗水量来计算植被的生态补水量, 并研究湿地的健康状况以及湿地生态需水的满足程度。

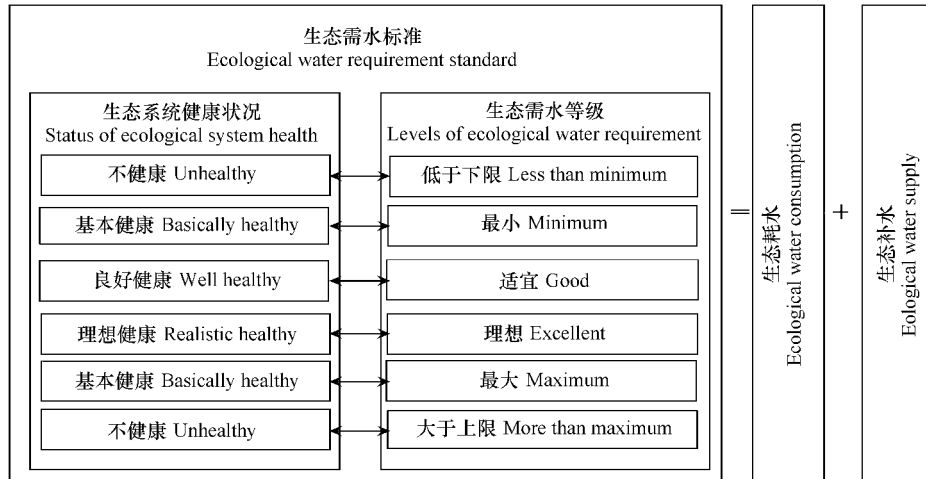


图2 生态系统健康、生态需水、生态耗水及生态补水之间的关系框架

Fig. 2 Relationship between ecological water requirement, ecosystem health, ecological water consumption and ecological water supply

表4 黄河三角洲湿地芦苇需水量级别划分^[28]Table 4 Levels of ecological water requirement of *Phragmites australis* in the Yellow River Delta wetland

级别 Level	盖度 (%) Vegetation coverage Fraction	高度 (m) Height	湿地面积 (hm ²) Area	芦苇级别 <i>Phragmites australis</i> level	蒸散量 (mm) ET	需水量 (m ³) Ecological water requirement
最小 Minimum	50	1.5	A	IV	1000	(1) A × 10 ⁴
中等 Middle	50 ~ 60	1.5 ~ 2.5	A	III	1000 ~ 1200	(1 ~ 1.2) A × 10 ⁴
优 Good	60 ~ 80	2.5 ~ 3.5	A	II	1200 ~ 1400	(1.2 ~ 1.4) A × 10 ⁴
最优 Excellent	80	3.5 ~ 4.0	A	I	1400 ~ 1600	(1.4 ~ 1.6) A × 10 ⁴
最大 Maximum	100	> 4.0	A	I	1600 ~ 1900	(1.6 ~ 1.9) A × 10 ⁴

3 结果与分析

3.1 验证结果

本文估算了该地区 2001 ~ 2005 年的蒸散量,分别从月蒸散量以及年蒸散量两个时间尺度上,对遥感估算的水体像元的蒸发量与东营站 E601 蒸发皿测量的实测数据而折算的 20m²蒸发池所代表的水面蒸发量进行了比较分析(图 2)。其中月蒸发量为每年 3 ~ 11 月份的月蒸发量(图 2a)。

由图 3 所示,遥感估算的水面蒸发月平均蒸发量与东营站 E601 折算的水面蒸发量基本一致。两者的均方根误差 RMSD 为 16.4mm,平均绝对百分比误差 MAPD 为 11.9%,相关系数为 0.85;年平均蒸散量与东营站 E601 蒸发皿观测值折算的水面蒸发数据的均方根误差 RMSD 为 48mm,平均绝对百分比误差 MAPD 为 3.8%,相关系数为 0.76。由此可见遥感估算值基本符合实际状况。

RMSD 及 MAPD 统计量的计算公式表达为:

$$MAPD = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{O_i} \quad (17)$$

$$RMSD = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right|^{1/2} \quad (18)$$

式中, n 为样本数; P_i 为估算值; O_i 为观测值。

3.2 黄河三角洲湿地蒸散量时空分布

3.2.1 空间变化

由黄河三角洲蒸散量空间分布图(图 4)可以看出黄河三角洲地区 2001 ~ 2005 年的年蒸散量的空间分布

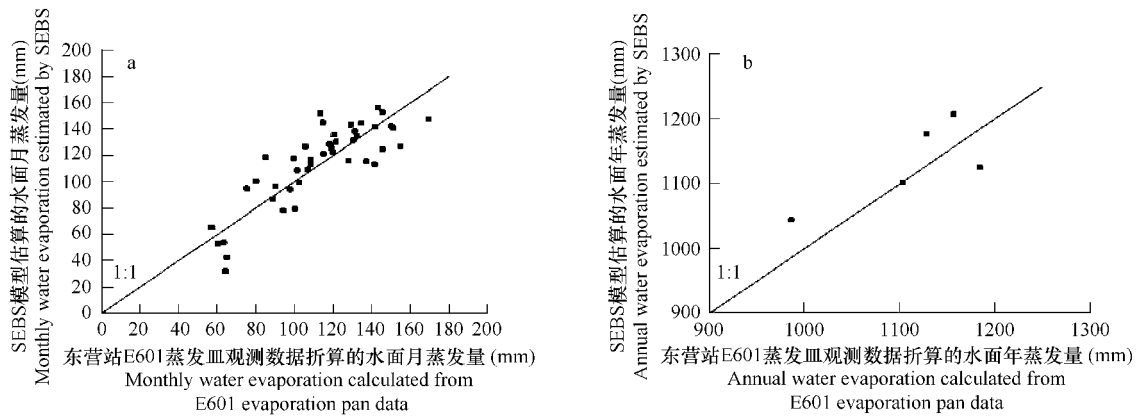


图3 SEBS模型估算的水面蒸发与东营站E601折算的水面蒸发量的比较

Fig. 3 Comparison of water surface evaporation between the estimation by SEBS model and the calculation from E601 evaporation pan
(a) 2001 ~ 2005 年每年 3 ~ 11 月份的月蒸发量的比较 (b) 2001 ~ 2005 年的年蒸发量的比较 (a) monthly evaporation (3 ~ 11) from 2001 to 2005 ; (b) annual evaporation from 2001 to 2005

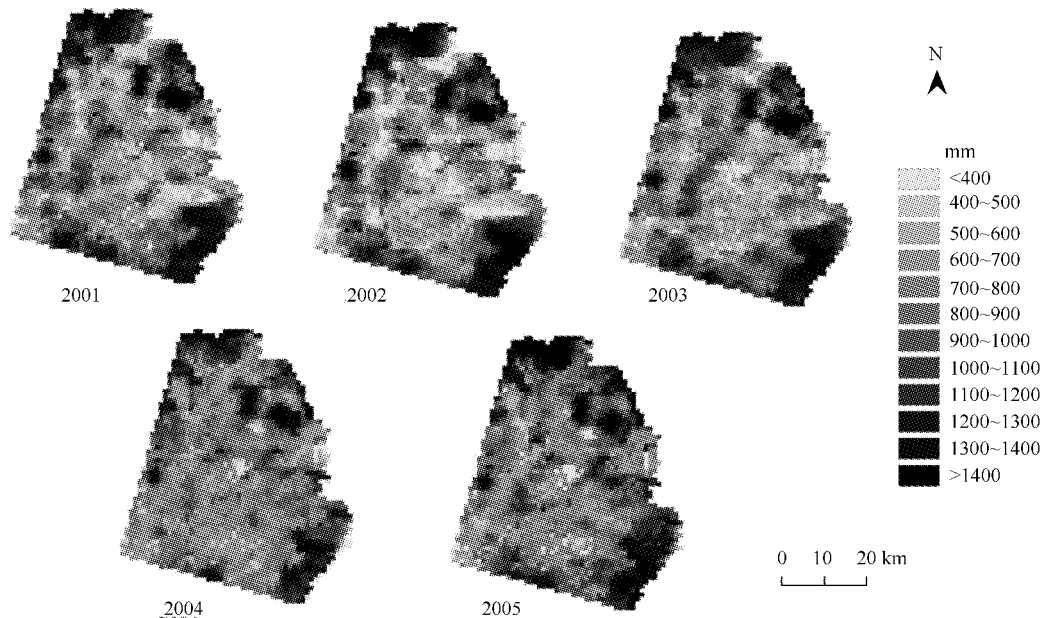


图4 2001 ~ 2005 年黄河三角洲蒸散量的空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of annual ET in the Yellow River Delta wetland from 2001 to 2005

趋势基本一致,但 2002 年蒸散量值的空间分布差异最大,这是由于 2002 年比较干旱,使得水分充足区域的蒸散量较其它年份要大;而另一方面 2002 年的降水少,使靠降水补给的地区土壤水分降低,蒸散量较小。2004 年和 2005 年的降水较多,使得土壤水分较多,植被与土壤等的蒸散量较大。

结合土地利用/覆盖图(图 1)来看:滩涂、盐田、虾池和内陆水体蒸散量最大,翅碱蓬、芦苇沼泽、芦苇草甸等耐水植被次之,柽柳-翅碱蓬群落、盐碱地、旱地作物、荒地、刺槐林、柽柳灌丛以及居民地的蒸散量最小。从 2001 ~ 2005 年的平均状况(图 5)来看,水体的蒸发量在 1100 ~ 1400mm 之间,滩涂的蒸散量为 1307mm,翅碱蓬的蒸散量为 1017mm,芦苇沼泽为 899mm,芦苇草甸为 864mm,柽柳-翅碱蓬群落为 852mm,盐碱地为 815mm,旱地作物的年蒸散量为 753mm,荒地为 729mm,刺槐林为 682mm,柽柳灌丛为 671mm,居民地最小为 511mm。总体来看,水体及水体周围湿地的蒸散量较大,滨海滩涂、黄河故道以及黄河两岸沼泽湿地的蒸散量次之,而内陆的居民地等蒸散量相对较小。

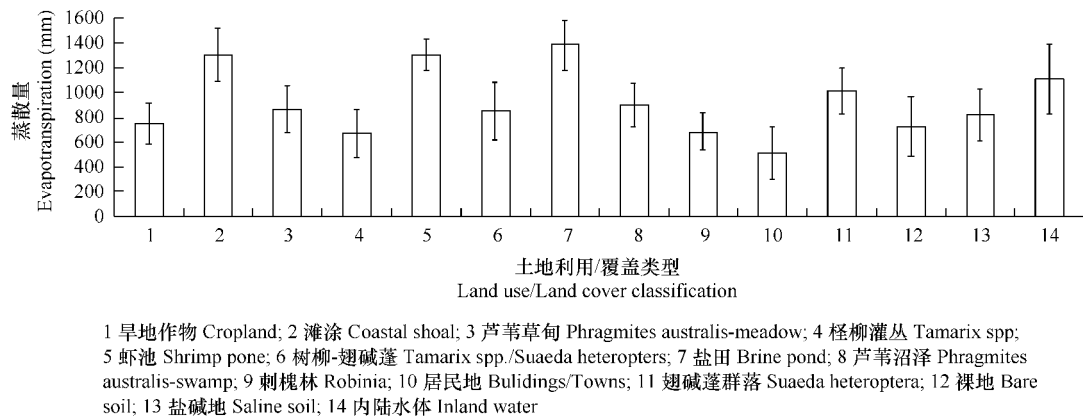


图5 黄河三角洲湿地各土地利用/覆盖类型的年蒸散量图

Fig. 5 Evapotranspiration from different land use/cover classification in Yellow River Delta wetland

3.2.2 时间变化

图6为黄河三角洲湿地2001~2005年蒸散量年际变化图,黄河三角洲湿地2001~2005年平均年蒸散量为882mm,并且有逐渐增加的趋势。2001~2005年蒸散量的相对变率在6%以内,蒸散量的年际变化不大。

图7为黄河三角洲湿地2001~2005年蒸散量的年内变化图。从图中可以看出,蒸散量的年内变化呈单峰分布,蒸散量主要集中在5~9月份,占全年蒸散量的60%。5~9月份是植被生长的主要阶段,气温较高,蒸散量较大;反之其它月份植被稀少或已凋零,气温较低,故蒸散量较小。

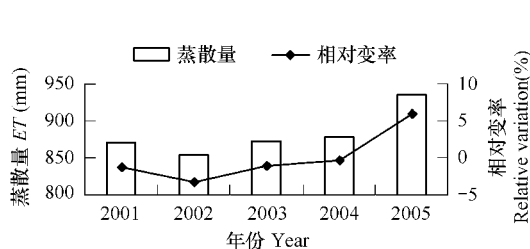


图6 黄河三角洲2001~2005年蒸散量的年际变化

Fig. 6 Annual variation of evapotranspiration in the YRD wetland between 2001 and 2005

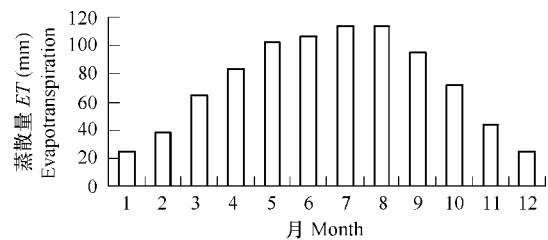


图7 黄河三角洲湿地2001~2005年多年平均月蒸散量值

Fig. 7 Mean monthly ET in the Yellow River Delta wetland from 2001 to 2005

黄河三角洲湿地的水分补给方式主要为降水补给。从图8可以看出黄河三角洲湿地的降水量年际变化较大,2001和2002年降水少,年降水量分别仅为434mm和389mm,而且大部分月份的蒸散量大于降水量,仅有7月份降水量大于蒸散量。2003~2005年的降水量相对较多,达到了700mm左右,降水量比较大的月份集中在6、7、8月份,同时也是蒸散量比较大的时期。另外黄河三角洲湿地春季降水量少,蒸散量大于降水量,而这个时期是作物生长的初期阶段,也是植被水分需要的重要时期。

3.3 生态需水量

芦苇蒸散量的大小直接与地表水分状况、芦苇生长状况等有关,由表4可知,芦苇年蒸散耗水量在1400~1600mm的情况下,其水分状况最能满足芦苇生长的需要。而当芦苇年蒸散耗水量在1000mm以下,说明此时的水分状况低于芦苇生长的最小需水条件,芦苇处于缺水状态,芦苇生长受到了水分亏缺的影响,若不及时补充水分,芦苇就有可能退化。然而芦苇的年蒸散量大于1900mm的情况下,水分过多,同样也会威胁到芦苇的正常生长。总之,从芦苇的蒸散耗水量可以判断出地表的水分状况是否可以满足芦苇的正常生长。

根据遥感估算的2001~2005年黄河三角洲湿地蒸散量,可以得到该地区芦苇草甸以及芦苇沼泽的生态耗水量结果,并根据表4划分的等级进行分级统计(图9和图10)。从统计结果来看,黄河三角洲湿地芦苇草

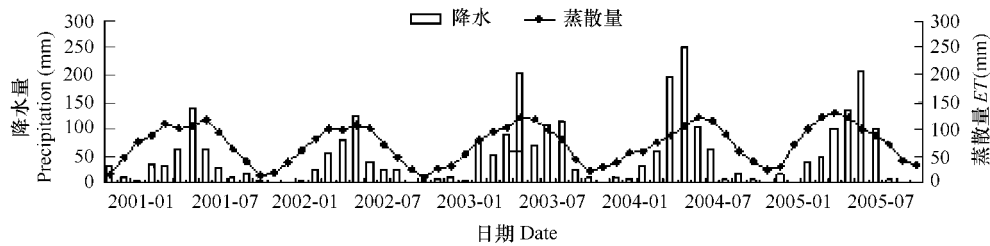


图 8 黄河三角洲湿地 2001 ~ 2005 年各月蒸散量与降水量的分布图

Fig. 8 Monthly ET and precipitation in the Yellow River Delta wetland from 2001 to 2005

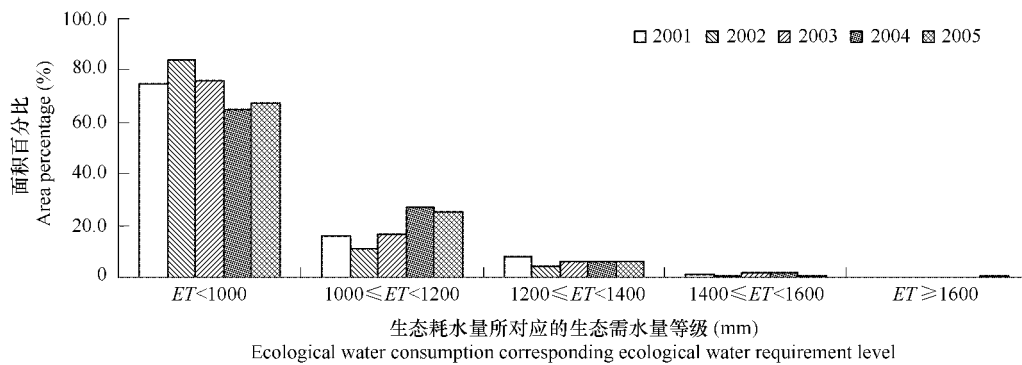


图 9 2001 ~ 2005 年黄河三角洲湿地芦苇草甸的生态耗水量所对应的生态需水各等级所占的面积百分比及年际变化情况

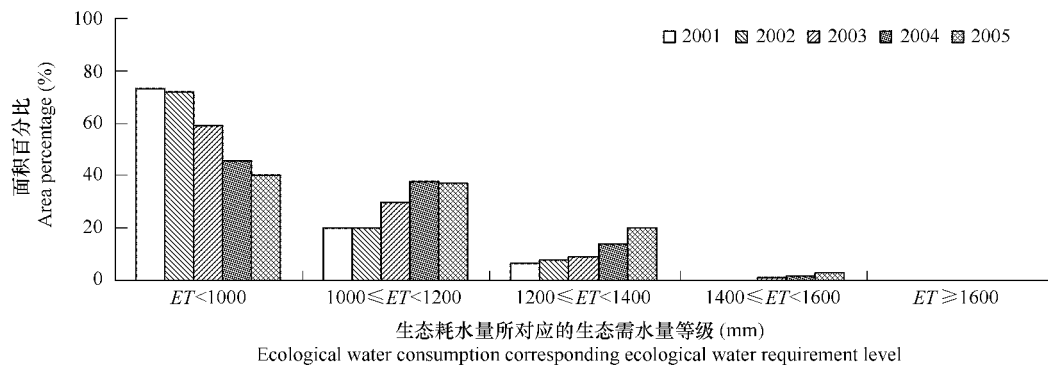
Fig. 9 Annual variation of area percentage corresponding to each level of water requirement calculated based on ecological water consumption for *Phragmites australis*-meadow over the YRD wetland from 2001 to 2005

图 10 2001 ~ 2005 年黄河三角洲湿地芦苇沼泽的生态耗水量所对应的生态需水各等级所占的面积百分比及年际变化情况

Fig. 10 Annual variation of area percentage corresponding to each level of water requirement calculated based on ecological water consumption for *Phragmites australis*-swamp over the YRD wetland from 2001 to 2005

甸和芦苇沼泽大部分处于缺水状态,芦苇生长处于不健康状况,尤其在 2001 年和 2002 年。2001 年,有 75% 的芦苇草甸和 73% 的芦苇沼泽的生态耗水量在芦苇生长的最低要求 1000mm 以下,只有 25% 的芦苇草甸和 27% 的芦苇沼泽能够保证正常生长。2002 年,情况更为恶化,有 84% 的芦苇草甸和 72% 的芦苇沼泽处于缺水状态,只有 16% 的芦苇草甸和 28% 的芦苇沼泽能够保证正常生长。2003 年以后,芦苇草甸和芦苇沼泽都有所恢复,到了 2005 年,芦苇草甸比 2001 年的状况改善较多,芦苇沼泽的改善程度更为显著,只有 40% 的芦苇沼泽处于缺水状态,而且 20% 的芦苇沼泽处于“优”的生长状况。这主要是由于 2003 ~ 2005 年间的降水量比 2001 年和 2002 年多,为芦苇湿地的改善和恢复提供了良好的天然环境。而且 2002 年以后,黄河三角洲自然保护区管理局开始对芦苇湿地进行保护和恢复,取得了明显的成绩。另外,芦苇生长状况的改善也可从

2001~2005 年芦苇叶面积指数 LAI 的逐年增加趋势中反映出来(表 5)。

表 5 2001~2005 年黄河三角洲芦苇草甸和芦苇沼泽生长季(5~9 月份)平均 LAI 的年际变化

Table 5 Annual variation of Leaf Area Index of *Phragmites australis*-meadow and *Phragmites australis*-swamp in growing periods (from May to September) in Yellow River Delta wetland from 2001 to 2005

植被类型 Vegetation types	年份 Year				
	2001	2002	2003	2004	2005
芦苇草甸 <i>Phragmites australis</i> -meadow	1.3	1.1	1.3	1.6	1.5
芦苇沼泽 <i>Phragmites australis</i> -swamp	1.6	1.2	1.8	1.9	2.0

总之,2001~2005 年期间,黄河三角洲的芦苇湿地正在向好的方向发展,芦苇湿地的恢复也取得了一定的成绩,以后应该在现有基础上进一步对芦苇湿地进行保护和恢复。

3.4 生态补水量

从 2001~2005 年的芦苇生态耗水状况可以看出,黄河三角洲湿地芦苇的生长状况正在不断的改善,但是仍有大部分芦苇湿地处于水分缺乏的境地,若要使其得到进一步的恢复,则需对芦苇湿地进行补水。

每年芦苇草甸处于缺水状态的面积都在 60% 以上,由此可见,若要对芦苇草甸进行恢复,必须在目前现状的基础上对芦苇草甸进行补水。芦苇草甸的生态耗水量与生态补水量如表 6 所示。若恢复到芦苇的最小生态需水量对应的 IV 级水平,每年的补水量并不相同,2002 年最多,为 $8.4 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。2004 年最少,为 $2.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。其它各等级生态补水量详见表 6。降水量是芦苇草甸的主要水分补给方式,2002 年降水少,属于旱年,所以导致了天然水量供应的减少,因而对人工补水需求量就比较大。而 2004 年的降水量比较丰沛,使得补水需求量相对较小。

芦苇沼泽与芦苇草甸相比,面积要小很多。但是其对黄河三角洲湿地系统的生物多样性以及沼泽生态有很重要的作用,是淡水湿地的主要植被类型。芦苇沼泽系统为黄河三角洲地区的很多珍禽提供良好的栖息场所,如丹顶鹤等。芦苇沼泽的生态耗水量与生态补水量如表 6 所示。若将芦苇沼泽植被恢复到芦苇最小生态需水量对应的 IV 级水平,2002 年芦苇沼泽的生态补水量为 $1.7 \times 10^7 \text{ m}^3$,2004 年生态补水量最小为 $5.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ (表 6)。芦苇沼泽分布在常年积水或季节性积水的区域,其主要的水分补给为降水和人工补水。2002 年黄河三角洲地区的降水少,上游来水也少,芦苇沼泽也处于缺水严重的境地,而 2004、2005 年该地区的降水和上游来水都有所增加,改善了该地区的水分情况,使得大部分地区基本能够满足芦苇的需水要求,也就使得人工补水量减少。

4 结论与讨论

本文将遥感估算的蒸散量与植被生态需水量相结合,研究湿地植被的水分供应情况及恢复所需的补水量问题,对湿地生态系统保护与管理具有参考价值。具体结论如下:

通过验证分析,黄河三角洲湿地蒸散量的遥感估算值基本能够满足实际应用的要求。遥感估算的月水面蒸发量与蒸发皿观测折算得到的水面蒸发量的相关系数为 0.85,均方根误差 RMSD 为 16.4mm,平均相对百分比误差 MAPD 为 11.9%,遥感估算值与实测值基本一致。

在黄河三角洲湿地,由于各种湿地植被类型空间分布的非均匀性、不同的植被生长季节及土壤含水量的变化,使得该区域内蒸散量的空间分布不均匀,以水体及水体周围湿地的蒸散量较大,滨海滩涂、黄河故道以及黄河两岸沼泽湿地的蒸散量次之,而内陆的居民地等蒸散量相对较小。湿地植被蒸散量从高到低依次为翅碱蓬、芦苇沼泽、芦苇草甸、柽柳-翅碱蓬群落、旱地作物、刺槐林、柽柳灌丛。

黄河三角洲湿地年蒸散量的年际变化不大,但不同年份的同一月份的蒸散量有明显的差异。黄河三角洲湿地年内蒸散量呈单峰分布,蒸散量主要集中在 3~10 月份。其中 5、6、7 月份蒸散量最大,蒸散量在 110~120mm 之间。11、12、1、2 月份蒸散量最小,在 20~40mm 之间。

表 6 2001~2005 年芦苇沼泽和芦苇草甸的生态需水量、生态耗水量以及生态补水量

Table 6 Ecological water requirement, water consumption and water supply of *Phragmites australis*-meadow and *Phragmites australis*-swamp from 2001 to 2005

年份 Year	芦苇恢复 的目标级别 Level of <i>Phragmites</i> <i>australis</i> recovery	芦苇沼泽 <i>Phragmites australis</i> -swamp				芦苇草甸 <i>Phragmites australis</i> -meadow			
		补水的面积 (km ²) Water supply area	生态需水量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$) Ecological water requirement	蒸散耗水量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$) ET consumption	生态补水量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$) Ecological water supply	补水的面积 (km ²) Water supply area	生态需水量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$) Ecological water requirement	蒸散耗水量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$) ET consumption	生态补水量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$) Ecological water supply
2001	IV	58	0.58	0.43	0.15	227	2.27	1.73	0.54
	III	58~74	0.58~0.89	0.43~0.60	0.15~0.28	227~275	2.27~3.30	1.73~2.26	0.54~1.04
	II	74~79	0.89~1.11	0.60~0.67	0.28~0.44	275~300	3.30~4.20	2.26~2.58	1.04~1.62
	I	79	1.11~1.26	0.67	0.44~0.60	300~303	4.20~4.85	2.58~2.62	1.62~2.23
2002	IV	57	0.57	0.4	0.15	255	2.25	1.71	0.84
	III	57~73	0.57~0.88	0.40~0.58	0.15~0.28	255~289	2.25~3.47	1.71~2.08	0.84~1.39
	II	73~79	0.88~1.11	0.58~0.65	0.28~0.44	289~302	3.47~4.23	2.08~2.25	1.39~1.98
	I	79	1.11~1.26	0.65	0.44~0.60	302~303	4.23~4.85	2.25~2.26	1.98~2.59
2003	IV	59	0.59	0.45	0.17	230	2.30	1.68	0.62
	III	59~77	0.59~0.92	0.45~0.65	0.17~0.30	230~280	2.30~3.36	1.68~2.23	0.62~1.13
	II	77~78	0.92~1.09	0.65~0.66	0.30~0.45	280~298	3.36~4.17	2.23~2.46	1.13~1.71
	I	78~79	1.09~1.26	0.66~0.67	0.45~0.61	298~303	4.17~4.85	2.46~2.53	1.71~2.32
2004	IV	36	0.36	0.31	0.05	196	1.96	1.71	0.25
	III	36~66	0.36~0.79	0.31~0.63	0.05~0.16	196~279	1.96~3.35	1.71~2.61	0.25~0.74
	II	66~77	0.79~1.08	0.63~0.77	0.16~0.30	279~298	3.35~4.17	2.61~2.85	0.74~1.33
	I	77~79	1.08~1.26	0.77~0.80	0.30~0.46	298~303	4.17~4.85	2.85~2.92	1.33~1.93
2005	IV	32	0.32	0.27	0.05	203	2.03	1.71	0.32
	III	32~61	0.32~0.73	0.27~0.59	0.05~0.14	203~280	2.03~3.36	1.71~2.54	0.32~0.82
	II	61~77	0.73~1.08	0.59~0.79	0.14~0.29	280~299	3.36~4.19	2.54~2.79	0.82~1.40
	I	77~79	1.08~1.26	0.79~0.82	0.29~0.45	299~301	4.19~4.82	2.79~2.81	1.40~2.0

芦苇等植被生态需水量与植被的生长周期和湿地的气象状况有关,芦苇的生态补水量也根据不同年份的气象因素的不同而不同。2001~2005 年期间,大部分湿地芦苇处于缺水状态,芦苇生长处于不健康状况,尤其 2002 年,2004 年情况有所改善。2002 年生态补水量最大,在 $9.9 \times 10^7 \sim 3.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间。其中芦苇沼泽最小补水量为 $1.5 \times 10^7 \text{ m}^3$,芦苇草甸最小补水量为 $8.4 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。2004 年的生态补水量最小,为 $3.0 \times 10^7 \sim 2.39 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间。其中芦苇沼泽的最小补水量为 $5.0 \times 10^6 \text{ m}^3$,芦苇草甸为 $2.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。对芦苇湿地进行恢复以及人工补水需要考虑当年降水量的丰沛情况,也要考虑到芦苇在不同生长季节的需水特点以及芦苇湿地的水分状况,同时还要考虑土壤的改良以及盐分的降解等方面因素,要根据实际状况结合生态需水特征,因地制宜、因时制宜地研究合理的补水措施和补水量,以期能用最少的水资源恢复尽可能多的芦苇湿地,提高水资源的利用效率,使整个生态环境更适合芦苇的生长。

以往对生态需水量的研究多针对不同类型生态系统的需水理论和计算方法进行探讨,将生态系统的需水量与其水资源现实状况联系起来解决实际补水问题的研究却很少。由于缺乏实测的蒸散量数据,本文仅利用气象站的蒸发皿数据对蒸散量的遥感估算模型进行验证,仍有待进一步检验。另外,本文只从植被需水量方面进行了探讨,并没有对土壤需水量以及野生动物栖息需水量进行分析,这将在以后的工作中进一步研究。

References:

- [1] Tang N, Cui B S, Zhao X S. The restoration of reed wetland in the Yellow River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2616—2623.
- [2] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, *et al.* Canopy temperature as a crop water stress indication. *Water Resour Res*, 1981, 17(4): 1133—1138

- [3] Jiang L, Islam S. A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26 (17) : 2773 — 2776.
- [4] Moran M S, Rahman A F, Washburne J C, *et al.* Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 80:87 — 109.
- [5] Liu S M, Sun R, Sun Z P, *et al.* Evaluation of Three Complementary Relationship Approaches for Evapotranspiration over the Yellow River Basin. *Hydrological Processes*, 2006, 20(11) :2347 — 2361.
- [6] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, Holtslag A A M. The surface energy balance algorithm for land (SEBAL) : Part 1 Formulation, *Journal of Hydrology*, 1998, 212 — 213:198 — 212.
- [7] Liu S M, Hu G, Lu L, *et al.* Estimation of Regional Evapotranspiration by TM/ETM + Data over Heterogeneous Surfaces. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2007, 73(10) , 1169 — 1178.
- [8] Norman J M, Kustas W P, Humes K S. A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observation of directional radiometric surface temperature. *Agric For Meteorol*, 1995, 77:263 — 293.
- [9] Menenti M, Choudhury B J. Parameterization of land surface evapotranspiration using a location-dependent potential evapotranspiration and surface temperature range. In: H. J. Bolle *et al.* Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales. *IAHS Publ.* 1993. No. 212, 561 — 568.
- [10] Su Z. A Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes from point to continental scale. // Su Z, Jacobs J, eds. *Advanced Earth Observation Land Surface Climate*. Publications of the National Remote Sensing Board (BCRS), USP-2, 01-02, 2001. 91 — 108.
- [11] Su Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6(1) :85 — 99.
- [12] Jia Li, Su Z B. Bart van den Hurk *et al.* Estimation of sensible heat flux using the Surface Energy Balance System (SEBS) and ATSR measurements. *Physics and Chemistry of Earth*, 2003. 28:75 — 88.
- [13] Su Z B, Wen J, Wan L. A methodology for the retrieval of land physical parameters and actual evaporation using NOAA/AVHRR data. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2003, 33:106 — 118.
- [14] He Y B, Su Z B, Li J, *et al.* Estimation of surface flux using surface energy balance system (SEBS) in the Yellow-Haihe-Haihe River regions, China. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(6) :1092 — 1102.
- [15] He Y B, Su Z B, Li J, *et al.* Regional evapotranspiration of different land covers based on remote sensing. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(2) :288 — 296.
- [16] Zhan Z M, Feng Z D, Qin Q M. Study on land surface evapotranspiration based on Remote Sensing data on Longxi Loess Plateau of China. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(1) :16 — 19.
- [17] Zhou Y X, Wang L M, Chen S B, *et al.* A Remote Sensing based land surface evapotranspiration model for the west of Jilin Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2005, 35(6) :812 — 817.
- [18] Zhang C C, Wang X Y, Shao J L. Estimates of evapotranspiration based on NOAA data in Yellow River Delta. *Resources Science*, 2005, 27(1) : 86 — 91.
- [19] Zhang C C, Wang G Q, Wei J H, *et al.* Estimates of evapotranspiration based on TM and NOAA data in the Yellow River Delta. *Journal of Tsinghua University*, 2002, 45(9) :1184 — 1188.
- [20] Liang, S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I. Algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 2000. (76) : 213 — 238.
- [21] Waters R, R Allen, M Tasumi, *et al.* SEABL (Surface Energy Balance Algorithms for land) : Advanced Training and Users Manual, version 1.0, 2002, 98.
- [22] Zhang R H. Experimental Remote Sensed model and land surface validation. Beijing: Sciences Press, 1996. 219.
- [23] Gao Z Q, Bian L G, Lu C G, *et al.* Estimation of aerodynamic parameters in urban areas. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13: 16 — 34.
- [24] Owen P R. and Thomson W R. Heat transfer across rough surfaces. *J. Fluid. Mech.*, 1963, 15:321 — 324.

- [25] Brutsaert W. Evaporation into the atmosphere: Theory, history and applications. D. Reidel Publishing Company, Boston, USA, 1982. 299.
- [26] Sugita M, Brutsaert W. Daily evaporation over a region from lower boundary layer profiles. *Water Resour. Res.*, 1991, 27:747—752.
- [27] Verhoef W. Application of Harmonic Analysis of NDVI Time Series(HANTS), In: Azzali and Menenti eds. Fourier analysis of temporal NDVI in the Southern African and American continents. Report of DLO Winand Staring Centre, Wageningen (The Netherlands), 1996.
- [28] Hong J L, Fu G B, Guo Z N, *et al.* Experimental research on the water-surface evaporation of Nansi Lake in Shandong Province. *Geographical Research*, 1996, 15(3):42—49.
- [29] Yang Z F, Cui B S, Liu J L, *et al.* Theory, Method and Application of Ecological and Environmental Water Demand. Beijing: Sciences Press, 2003. 95.

参考文献:

- [1] 唐娜, 崔保山, 赵欣胜. 黄河三角洲芦苇湿地的恢复. *生态学报*, 2006, 26(8):2616~2623.
- [14] 何延波, Su ZB, 贾立, 等. SEBS 模型在黄淮海地区地表能量通量估算中的应用. *高原气象*, 2006, 25(6):1092~1102.
- [15] 何延波, Su ZB, 贾立, 等. 遥感数据支持下不同地表覆盖的区域蒸散. *应用生态学报*, 2007, 18(2):288~296.
- [16] 詹志明, 冯兆东, 秦其明. 陇西黄土高原陆面蒸散的遥感研究. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(1):16~19.
- [17] 周云轩, 王黎明, 陈圣波, 等. 吉林西部陆面遥感蒸散模型研究. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2005, 35(6):812~817.
- [18] 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. *资源科学*, 2005, 27(1):86~91.
- [19] 张长春, 王光谦, 魏加华, 等. 联合 TM 和 NOAA 数据研究黄河三角洲地表蒸发(散)量. *清华大学学报*, 2005, 45(9):1184~1188.
- [22] 张仁华. 实验遥感模型及地面基础. 北京: 科学出版社, 1996. 219.
- [23] 高志球, 卞林根, 逯昌贵, 等. 城市下垫面空气动力学参数的估算. *应用气象学报*, 2002. 13: 26~34.
- [28] 洪嘉琰, 傅国斌, 郭早南. 山东南四湖水面蒸发实验研究. *地理研究*, 1996. 15(3):42~49.
- [29] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲, 等. 生态环境需水量理论、方法与实践. 北京: 科学出版社, 2003. 95.