

黄河三角洲湿地蒸发蒸腾及其对土地利用 覆被变化的响应特征研究

朱明明^{1,2,3}, 侯西勇^{1,3}, 应兰兰^{1,2}, 李明杰^{1,2}, 路晓^{1,2}

(1 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 以黄河三角洲为研究区, 基于 1986 年 6 月 5 日和 2009 年 6 月 4 日的 Landsat TM 影像进行土地利用覆被分类及变化特征研究, 同时, 基于 SEBAL 模型估算区域蒸发蒸腾量, 进而分析湿地蒸发蒸腾的数量特征、空间格局特征及其对土地利用覆被变化的响应特征。结果表明: 23 年间, 58.74% 的区域土地利用覆盖类型发生了变化, 未利用地大幅减少, 水体和建设用地位大幅增加, 显著的土地垦殖与耕地荒废则同时存在; 蒸发蒸腾强度大小按土地利用覆盖类型排序依次为水体 > 滩涂 > 苇地 > 林草地 > 耕地 > 建设用地 > 未利用地, 研究区未利用土地变为水体和耕地是导致区域蒸发蒸腾整体提高的主导原因, 而耕地流失则是导致区域蒸发蒸腾整体下降的主要原因, 但 23 年间实际变化以前一种情形占优势, 因而区域蒸发蒸腾总体呈现为增加趋势。研究结果对区域土地利用规划和水资源管理有重要的理论和实践指导意义。

关键词: 蒸发蒸腾; 湿地; 土地利用覆被变化; SEBAL; 黄河三角洲

中图分类号: P334.91; P426.22 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2011)02-0025-06

Study on evapotranspiration and its response to land use / cover change in Yellow River delta

ZHU Mingming^{1,2,3}, HOU Xiyong^{1,3}, YING Lanlan^{1,2}, LIMingjie^{1,2}, LUXiao^{1,2}

(1 Yantai Institute of Coastal Zone Research, CAS, Yantai 264003, China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3 State Key Laboratory

of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract Based on the Landsat TM images on June 5, 1986 and June 4, 2009, the paper carried out the research for the land use/cover change in the Yellow River Delta. The regional evapotranspiration (ET) was estimated based on the Surface Energy Balance Algorithm (SEBAL) model and analyzed the quantitative feature and spatial patterns of wetland evapotranspiration and its response to land use/cover change (LUCC). The results showed that the land use/cover types in 58.74% of the total areas had been changed during 23 years. Unused land reduced dramatically while construction land and water increased significantly. Land reclamation and abandon existed at the same time. The order of ET intensity by land use/cover were water > beach > reed > woodland and grassland > farmland > construction land > unused land. Unused land transferred into water and farmland led to increase ET, while the loss of farmland caused the decrease of ET. The former change dominated in the actual change process and therefore the regional ET showed an overall increasing trend during the 23 years. The results of the study have important theoretical and practical significance to regional land use plan and water resources management.

Key words evapotranspiration (ET); wetland; land use/cover change (LUCC); SEBAL; Yellow River Delta

收稿日期: 2010-11-19

基金项目: 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资助项目 (2007490211); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (kzcx2-yw-224)

作者简介: 朱明明 (1985-), 女, 山东烟台人, 博士研究生, 主要从事遥感蒸发蒸腾研究。

0 引言

蒸发蒸腾 (Evapotranspiration, ET) 是陆面水文过程中极其重要的分量, 决定了土壤-植被-大气系统中的水分和热量传输, 是近年来国际水科学研究的热点领域之一^[1]。土地利用覆被变化 (LUCC) 作为水文变化主要驱动要素之一, 改变了地表植被的截留量、土壤水分的入渗能力和地表蒸发等因素^[2], 与此同时, 水、热收支状况又在很大程度上决定地理环境的组成和演变^[3]。因此, 研究蒸发蒸腾对土地利用覆被变化的响应特征, 正确评估人类活动影响下的地表过程对自然和社会生态系统的影响, 可为分析土地利用覆被变化的水文效应、开展精细农业、水资源合理利用以及应对全球气候变化等提供科学依据。

从物理学和气象学角度研究蒸发蒸腾的历史很长。Dalton 于 1802 年提出道尔顿蒸发计算公式, Bowen 在 1926 年提出基于能量平衡方程计算蒸发蒸腾的波文比-能量平衡法^[4], Penman 于 1948 年将能量平衡原理和空气动力学原理结合, 建立了著名的 Penman 公式^[5], 在 Penman 公式的基础上, Monteith 引入“表面阻抗”的概念, 建立了具有坚实理论基础的 Penman-Monteith 公式^[6], 该方法于 1990 年被 FAO 定为计算参考作物蒸发蒸腾的标准方法。然而这些传统的蒸发蒸腾研究主要基于小范围区域, 结果不具代表性, 随着遥感和 GIS 技术的发展, 蒸发蒸腾研究得以推广到大范围几何结构和物理性质非均匀的区域尺度上。2000 年, Roerink 等提出了简化的地表能量平衡指数法 (S-SEBI) 计算蒸发蒸腾^[7], 荷兰学者苏中波提出了地表能量平衡系统 (SEBS) 估算地表蒸发蒸腾^[8]。SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) 模型是 Bastiaansen 提出的区域蒸发蒸腾遥感估算模型^[9-10], 被广泛应用于美国、中国、巴西、西班牙等不同气候条件的区域^[11-14]。

本文基于 1986 年 6 月 5 日和 2009 年 6 月 4 日两景 Landsat5 TM 数据进行土地利用覆被分类和变化特征研究, 同时基于 SEBAL 模型估算黄河三角洲湿地日蒸发蒸腾, 进而借助于 GIS 空间分析技术, 揭示湿地日蒸发蒸腾的数量特征和空间格局特征及其对土地利用覆被变化的响应特征。研究旨在为黄河三角洲水资源合理利用、土地利用规划和湿地生态系统保护等提供基础的科技支持。

1 数据与方法

1.1 研究区概况与数据准备

黄河三角洲位于渤海湾和莱州湾沿岸, 是中国暖温带最完整、最广阔、最年轻的湿地生态系统。该区域属北温带季风型大陆性气候, 年平均气温为 12.3℃, 年降水量 537.3 mm, 年均蒸发量 1900 mm, 年均风速 4 m/s, 降水年内分配不均且蒸发量大。地势总体平缓, 南高北低, 西高东低, 地貌特征以海拔小于 7m 的低平原为主。地下水埋深浅, 矿化度高, 土壤盐渍化程度高, 淡水资源严重缺乏。该区域同时也是重要的石油生产和石油化工基地, 是中国第二大油田-胜利油田所在地。受全球变化和人类活动因素的影响, 黄河三角洲湿地生态系统脆弱、不稳定, 因而是国内外多学科研究共同关注的热点和焦点区域。

本文研究采用的原始数据包括: ① Landsat5 TM 影像, Path/Row 为 121/34, 成像时间为 1986 年 6 月 5 日上午 10 点和 2009 年 6 月 4 日上午 10:30 预处理包括辐射定标、几何校正、区域裁剪以及云覆盖和异常值区域掩膜处理等; ② 影像获取日的气象数据, 包括风速、温度、湿度、日照时数等, 来自于国家气象局的气象台站监测信息; ③ 数字高程模型信息, 为 NASA 等所提供的 SRTM DEM 共享信息, 分辨率为 90 m。

1.2 研究方法

1.2.1 土地利用覆被分类 2009 年土地利用数据是在野外考察与调研的基础上对 6 月 4 日的遥感影像进行目视解译而得到, 解译过程中还参照了河口区 2007 年和东营市 2005 年的土地利用现状图。1986 年土地利用数据同样采用目视解译的方式得到, 解译过程中参照了中国科学院地理科学与资源研究所提供的 1986 年土地利用分类信息^[15]。

采用的土地利用分类系统综合了野外考察所获取的信息以及上述已有土地利用分类图信息, 具体包括: 水体 (养殖池、盐田、水库、河渠)、耕地 (旱地、水田)、林草地 (林地、灌草地)、苇地、建设用地 (城镇用地、农村居民地、其他建设用地)、滩涂和未利用地 (裸地、盐碱地)。

1.2.2 SEBAL 模型 SEBAL 模型是基于地表能量平衡原理的单层模型, 利用遥感影像的可见光、近红外和热红外波段及少量的地面气象数据, 分别计算净辐射通量 (R_n)、土壤热通量 (G) 和感热通量 (H), 然后通过余项法求得潜热通量 (λET), 进而求

得瞬时蒸发蒸腾 (ET), 公式为:

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

时间尺度扩展是遥感理论研究和实际应用的重要问题, 将瞬时蒸发蒸腾扩展到日蒸发蒸腾的方法有积分关系法^[16]、比值法^[17-19]、统计经验法^[20]等。比值法通过计算影像中各个像元的瞬时蒸发比并假定蒸发比在一天中保持不变, 从而求得当日的蒸发蒸腾总量:

$$\Lambda_{inst} = \frac{\lambda ET}{R_n - G} = \Lambda_{24} \quad (2)$$

$$ET_{24} = \frac{86400 \Lambda_{24} (R_{n24} - G_{24})}{\lambda} \quad (3)$$

式中: Λ_{inst} 为瞬时蒸发比; Λ_{24} 为日蒸发比; λ 为气化潜热; ET_{24} 为日蒸发蒸腾; R_{n24} 为日净辐射; G_{24} 为日土壤热通量, 在计算日累计值时通常近似为零。

2 结果与分析

2.1 土地利用 覆被类型面积及其变化

1986-2009 年间, 黄河三角洲海岸线不断变化, 北部刁口段海岸蚀退和当前黄河入海口处的淤

进造陆现象同时存在, 为便于统计分析, 本文采用两幅影像的公共部分。在自然与人文因素共同作用下, 23 年间的变化复杂而剧烈, 变化区域面积为 441 077 hm^2 , 占研究区总面积的 58.74% (表 1)。研究区是山东省重要的棉粮生产基地, 耕地是主要的土地类型, 在 1986 年和 2009 年各占总面积的 42.51% 和 34.62%。

1986 年黄河三角洲开发刚刚起步, 未利用地和林草地面积分居二、三位, 至 2009 年, 水体和建设用地区大幅度增加, 成为除耕地外的主要类型。按照面积变化的绝对值大小排序为: 未利用地 \downarrow > 水体 \uparrow > 建设用地 \uparrow > 耕地 \downarrow > 滩涂 \downarrow > 林草地 \uparrow > 苇地 \uparrow (\uparrow 表示增加, \downarrow 表示减少), 而按照变化率绝对值大小排序则依次为水体 \uparrow > 建设用地 \uparrow > 未利用地 \downarrow > 苇地 \uparrow > 滩涂 \downarrow > 林草地 \uparrow > 耕地 \downarrow 。未利用地面积的大幅减少和水体、建设用地面积的大幅增加成为土地利用 覆被的主要变化类型, 变化率分别为 -71.41%、52.578% 和 29.176%。

表 1 1986-2009 年间土地利用 覆被类型的转移矩阵

1986 年	2009 年							1986 年合计
	水体	耕地	林草地	苇地	建设用地	滩涂	未利用地	
水体	14758	985	501	1575	1385	1327	409	20940
耕地	15578	184760	44469	4907	44778	1091	23677	319260
林草地	16059	11518	16396	13967	7428	2913	6628	74909
苇地	4693	3749	3842	8787	1618	74	2407	25170
建设用地	339	2506	1088	183	26461	8	459	31044
滩涂	24588	1478	3016	1316	3311	36115	2975	72799
未利用地	55023	54951	20619	9117	36637	7890	22584	206821
2009 年合计	131038	259947	89931	39852	121618	49418	59139	750943
面积变化	110098	-59313	15022	14682	90574	-23381	-147682	
变化率	52.578	-18.58	20.05	58.33	29.176	-32.12	-71.41	

土地利用类型间的转换, 主要以未利用地、耕地的转出和水体、建设用地的转入为主。未利用地变化最剧烈, 主要向水体、耕地、建设用地转化, 转化面积分别达研究区总面积的 7.33%、7.32%、4.88%。耕地主要转变为林草地、建设用地和未利用地。未利用地中的盐碱地在研究区占有较大比例, 辅助于一定的技术措施, 盐碱地可改造为耕地, 在管理不善或某些气候条件下, 耕地还会退化为盐碱地, 这种双向转化现象在研究区占一定比例。研究区地下水矿化度高, 黄河来水量不断减少, 淡水资源缺乏且空间分布不均, 因而当地大力发展平原水库以增加淡水

资源, 是水域面积增加的重要方面, 另外, 滩涂、浅海区域发展水产养殖和晒盐业等, 也都促使水体面积增长。建设用地的增加主要源自耕地和未利用地, 人口增长带来居民用地的需求增加、城市扩张和石油工业发展等都是其重要的驱动因素。

2.2 1986-2009 年日蒸发蒸腾的变化特征

基于 SEBAL 模型估算的两期日蒸发蒸腾结果如图 1 所示, 土地利用 覆被类型的不同导致蒸发蒸腾的空间格局差异显著。2009 年 6 月 4 日的蒸发蒸腾均值略高于 1986 年 6 月 5 日, 分别为 5.31 mm 和 5.09 mm。1986 年蒸发蒸腾的高值区主要分布

在研究区的北部、东部近海区域、南部以及中部部分区域,土地类型以水体、滩涂、苇地和林草地为主。2009年蒸发蒸腾在这些区域仍保持较高的水平,但面积有较大的增长,特别是研究区北部和东部的沿海滩涂,随着养殖业和晒盐业规模的扩大,蒸发蒸腾的高值区也大幅增加。此外,研究区南部灌溉条件良好的优质小麦区的蒸发蒸腾也较高。低值区主要出现在灌溉条件差的耕地、建设用地和未利用地等土地类型。

2.3 日蒸发蒸腾对土地利用 /覆被变化的响应特征
 土地利用 /覆被的剧烈变化深刻地影响着地表蒸发蒸腾过程,为了定量分析日蒸发蒸腾随土地利用 /覆被变化的动态变化,需要对两期蒸发蒸腾结果做比较。由于两期影像的获取时间不同,气候条件有所差异,为了排除气象因素对蒸发蒸腾的影响,突出蒸发蒸腾对土地利用 /覆被变化的响应特征,分别对两个时相的蒸发蒸腾进行标准化处理,然后进行差值运算^[21 22](见图 2)。

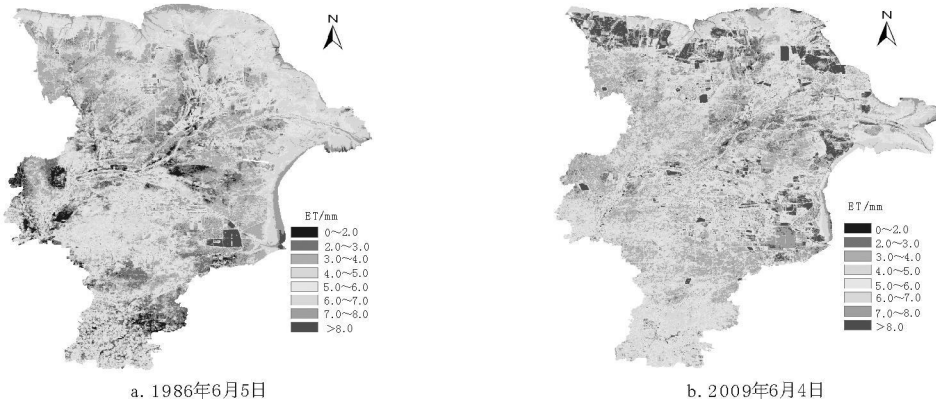


图 1 1986年 6月 5日和 2009年 6月 4日的日蒸发蒸腾分布图

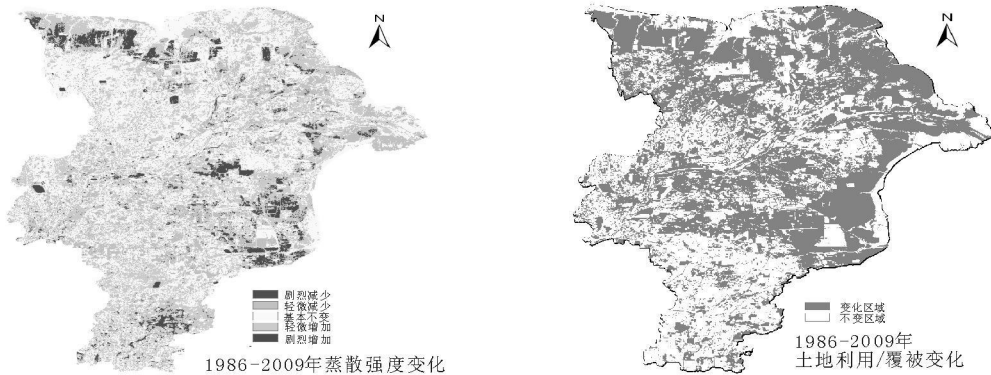


图 2 1986- 2009年蒸散强度变化分布图

图 3 1986- 2009年土地利用 /覆被变化分布图

将 1986- 2009年研究区蒸散强度变化划分为 5个等级: 剧烈减少(- 1~ - 0.4)、轻微减少(- 0.4~ - 0.1)、基本不变(- 0.1~ 0.1)、轻微增加(0.1~ 0.4)和剧烈增加(0.4~ 1)。图 2 显示出蒸散强度的变化在空间上的分布,其中剧烈增加的区域主要分布在研究区的西北部和中东部,轻微减少、轻微增加和基本不变的区域分布比较广泛。为了定量分析蒸散强度变化与土地利用 /覆被变化之间的关系,采用 ArcGIS软件的空间分析功能,结合 1986- 2009年土地利用 /覆被变化情况(图 3),对蒸散强度变化的五个等级的面积及其主要土地转移类型进行了统计(表 2和图 4)。结果表明,蒸散强度基本不变区

域占研究区总面积的 47.23%,其中变化的土地类型占总面积的 24.43%,未利用地→耕地、耕地→建设用地为主要转移类型。蒸散强度变化区域中近 2/3的区域蒸散强度有所增加,这些增加的区域中有 71.45%的土地利用 /覆被类型发生了变化。蒸散强度剧烈增加的区域中有 91.51%的区域土地利用类型发生改变,而各类用地转化为水体是蒸散强度增加的主要原因,其中以未利用地转变为水体的面积最多,占剧烈增加总面积的 53.10%。研究区 29.53%的区域蒸散强度轻微增加,是蒸散强度发生变化区域中面积最多的类型,土地转移类型以未利用地转化为水体和耕地为主。

表 2 1986-2009年蒸散强度变化统计 $\text{hm}^2, \%$

变化等级	土地利用 / 覆被类型					
	变化	百分比	未变化	百分比	总面积	百分比
剧烈减少	2750	0.37	1764	0.23	4515	0.60
轻微减少	67281	8.96	61924	8.25	129206	17.21
基本不变	183491	24.43	171211	22.80	354701	47.23
轻微增加	150218	20.00	71499	9.52	221717	29.53
剧烈增加	37341	4.97	3463	0.46	40804	5.43
减少合计	70032	9.33	63689	8.48	133720	17.81
增加合计	187560	24.98	74962	9.98	262521	34.96

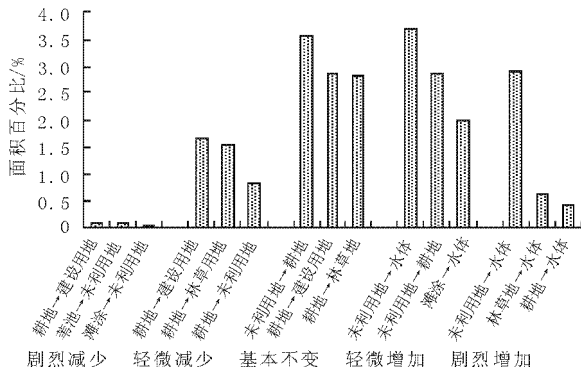


图 4 蒸散强度变化等级中的主要土地转移类型

蒸散强度减少的区域中 96.62% 的区域蒸散强度轻微减少,耕地转变为其他类型是主要的转移方向。剧烈减少的区域非常少,远远低于剧烈增加的区域,仅占研究区总面积的 0.6%。

下垫面植被种类和覆盖度的不同、土壤类型和含水量等的差异对蒸发蒸腾均有影响,因此,土地利用 覆被类型的变化将深刻影响地表蒸发蒸腾的水平。土地利用 覆被类型中面积转化较大的前 13 种类型见图 5 转化面积大小从左至右依次排列。13 种类型中有 9 种类型的蒸散强度增加,且增加幅度远远大于减少的 4 种类型。未利用地→水体不仅是转移面积最大的类型,而且是所有转移类型中(包括未列出的转移类型)蒸散强度变化最大的类型,由此可见未利用地→水体对研究区蒸发蒸腾的影响最为深刻。耕地→建设用地的蒸散强度减少了 1.86%,未利用地→建设用地、滩涂→水体、林草地→草地均有所增加。

图 5 反映出不同下垫面的蒸发蒸腾能力差异。水体和滩涂的蒸发蒸腾能力最强;未利用地下垫面几乎没有植被覆盖,土壤蒸发微弱;建设用地特别是城市居民点中的人工绿化植被、水体会提高建设用地的蒸发蒸腾;草地、林草地、耕地受植被、农作物类型和覆盖度的影响,呈现出中等水平的蒸发蒸腾能力。

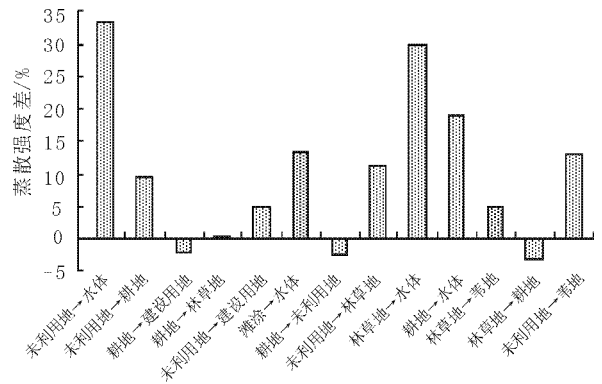


图 5 1986-2009年主要土地转移类型的蒸散强度差

3 结 语

以黄河三角洲为研究区,基于 Landsat TM 影像和 SEBAL 模型估算区域蒸发蒸腾,在 ArcGIS 空间分析技术的支持下,分析了 1986 年和 2009 年湿地蒸发蒸腾对土地利用 覆被变化的响应特征。

(1) 1986-2009 年间,土地利用 覆被类型发生了较大改变,未利用地大幅减少,水体和建设用地大幅增加。未利用地和耕地为主要的转出类型,水体和建设用地为主要的转入类型。

(2) 2009 年 6 月 4 日的蒸发蒸腾均值略高于 1986 年 6 月 5 日,土地利用 覆被类型的不同导致蒸发蒸腾的空间格局差异显著,高值区主要出现在水体、滩涂、草地和林草地等类型。

(3) 蒸散强度增加和减少的区域分别占研究区总面积的 34.96% 和 17.81%,变化区域中 65.01% 的区域土地利用 覆被类型发生了变化,变化面积最多的前 13 种类型中有 9 种类型的蒸散强度增加,且增加幅度远远大于减少的 4 种类型。

(4) 蒸散强度大小按土地利用 覆被类型排序依次为水体>滩涂>草地>林草地>耕地>建设用地>未利用地;未利用地转化为水体和耕地是导致区域蒸散大幅增加的主导原因,而耕地流失则是导致区域蒸散剧烈减少的主导原因,23 年间,土地利用 覆被变化以前一种情形为主,因而决定了区域蒸散总体增加的变化趋势。

通过研究,揭示了黄河三角洲湿地蒸发蒸腾对土地利用 覆被变化的响应特征,研究结果对于黄河三角洲水资源调配与管理、土壤盐渍化防治以及土地利用规划等将具有一定的理论指导意义。

参考文献:

- [1] 战车生,夏军. 中国陆面蒸发蒸腾量的遥感反演及时空格局 [M]. 北京: 知识产权出版社, 2009.

- [2] 李丽娟, 姜德娟, 李九一, 等. 土地利用 覆被变化的水文效应研究进展 [J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 211 - 224
- [3] 郭晓寅, 程国栋. 遥感技术应用于地表蒸发蒸腾的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 107- 114
- [4] Bowen I. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface [J]. *Physical Review*, 1926, 27(6): 779- 787.
- [5] Penman H. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [C]// . *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1948, 193(1032): 120- 145.
- [6] Monteith J. Environmental control of plant growth [M]. New York: Academic Press, 1963: 95.
- [7] 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.
- [8] Su Z. Remote sensing of land use and vegetation for mesoscale hydrological studies [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(2): 213- 233
- [9] 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
- [10] 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.
- [11] Ramos J G, Cratchley C R, Kay J A, et al. Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using ground- meteorological data available for the Fluena District into the Ebro Valley of NE Spain [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(4): 638- 652
- [12] Singh R K, Imak A, Imak 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.
- [13] 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.
- [14] Teixeira A, Bastiaanssen W G M, Ahmad M D, et al. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle Sao Francisco River basin, Brazil Part B: Application to the regional scale [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(3- 4): 477- 490.
- [15] 地球系统科学数据共享网项目. “黄河三角洲土地利用数据 (1984- 1986, 1991, 1996, 2001)” [DB/OL]. 2006
- [16] 谢贤群. 遥感瞬时作物表面温度估算农田全日蒸散总量 [J]. *环境遥感*, 1991, 6(4): 253- 260
- [17] 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
- [18] Allen R, Tasumi M, Trezza R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)² Model [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2007, 133(4): 380- 394
- [19] Tasumi M. Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery [D]. University of Idaho Moscow, Idaho, 2003: 357.
- [20] Carlson T N, Gillies R R, Schmugge T J. An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil water content [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 77(3- 4): 191- 205.
- [21] 刘朝顺, 高志强, 高 炜. 基于遥感的蒸发蒸腾及地表温度对 LCC响应的研究 [J]. *农业工程学报*, 2007, 23(8): 1- 8
- [22] 金 翠, 张 柏, 宋开山, 等. 土地利用 覆被变化对区域蒸发蒸腾影响的遥感分析——以吉林省乾安县为例 [J]. *干旱区研究*, 2009, 26(5): 734- 743.