



BOSHI WENKU

〔地理学〕

中国陆面蒸散发量的 遥感反演及时空格局

ZHONGGUO LUMIAN ZHEGNSANFALIANG DE
YAOGAN FANYAN JI SHIKONG GEJU

占车生 夏 军 著

知识产权出版社

本书得到国家自然科学基金项目(40901023)和国家重点基础研究发展计划(973计划)
(2010CB428400)的资助



BOSHI WENKU
[地理学]

中国陆面蒸散发量的 遥感反演及时空格局

ZHONGGUO LUMIAN

ZHEGNSANFALIANG DE

YAOGAN FANYAN JI SHIKONG GUBU

占车生 夏 军 著

知识产权出版社

内容提要

陆面蒸散发 (ET) 是水循环的关键一环,也是全球气候变化研究的重要内容。本书通过收集和处理中国陆地区域的气象、遥感数据以及土壤、植被等多源数据和地面验证资料,改进了一层定量遥感模型,估算了中国 1991 年、1995 年、1999 年三期陆面蒸散发量,并侧重探讨了遥感模型中相关关键参数的不确定性,同时,在此基础上对各年蒸散的时空格局以及影响因子的敏感性进行了定量分析。

责任编辑:江宜玲

装帧设计:Sun 工作室

图书在版编目 (CIP) 数据

中国陆面蒸散发量的遥感反演及时空格局/占车生,夏军著. —北京:知识产权出版社,2009.11

ISBN 978-7-80247-592-2/P·004

I. 中… II. ①占… ②夏… III. 水汽—蒸发—卫星遥感—研究—中国 IV. P426.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 196175 号

中国陆面蒸散发量的遥感反演及时空格局

占车生 夏 军 著

出版发行: 知识产权出版社

社 址: 北京市海淀区马甸南村 1 号

网 址: <http://www.ipph.cn>

发行电话: 010-82000860 转 8101/8102

责编电话: 010-82000860-8341

印 刷: 知识产权出版社电子制印中心

开 本: 880mm×1230mm 1/32

版 次: 2010 年 1 月第 1 版

字 数: 150 千字

ISBN 978-7-80247-592-2/P·004

邮 编: 100088

邮 箱: bjb@cnipr.com

传 真: 010-82000860-8240

责编邮箱: staphanie@sina.com

经 销: 新华书店及相关销售网点

印 张: 6.375

印 次: 2010 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 28.00 元

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题,本社负责调换。

摘 要

陆面蒸散发(ET)是水循环的关键一环,决定了土壤—植被—大气系统中的水、热传输,定量对其进行估算是评价陆地生态系统生产力、区域耗水、土壤水分运移、作物产量以及土地利用/土地规划的基础,更是全球或区域气候变化研究的重要内容。

本书利用定量遥感方法估算了中国 1991 年、1995 年、1999 年三期陆面蒸散发量。由于本研究区涉及全国陆面范围,空间尺度较大,且研究区内地形、气候千差万别,土地覆被类型也复杂多变,这给本研究带来了很大的挑战。为了更好地达到研究目的,本研究在对我国陆面 ET 进行模拟和分析的同时,侧重探讨遥感蒸散模型中相关关键参数的不确定性,力求较好地把握和认识大时空尺度 ET 反演的物理机制,建立区域尺度非均匀陆面实际蒸散发的普适遥感反演模式。依据这一研究目的,我们收集和处理了 1991~1999 年相关的气象数据、遥感数据以及其他土壤、植被等多源数据和地面验证资料,在对 SEBS 遥感模型改进的基础上,应用这一模型对中国 1991 年、1995 年、1999 年逐旬陆面蒸散进行了模拟,并在此基础上对以上三年蒸散的时空分布格局以及影响因子的敏感性进行了定量分析。本书主要在以下几个方面进行了比较深入的工作:

一、数据的处理

数据是研究工作的基础,数据的质量是影响模拟结果的重要因素。根据模型以及实际研究的需要,本研究进行了数据的收集

和处理。收集的相关资料和数据主要包括：遥感数据、地面数据（包括测量、观测或实验数据）、背景数据和历史资料，并对 NO-AA-AVHRR 遥感产品、气象数据、土地利用/土地覆盖 1km 栅格数据进行了格式统一的标准化处理。

二、模型的改造

结合中国具体区域特点，补充改善了原 SEBS 模型。基于全国土地利用/土地覆被分类，建立了随季节变化的不同覆被类型的动量粗糙度、零平面位移查找表；针对不同覆被类型建立了近地表气温—地表温度经验关系模型，能直接利用遥感数据获取大气温度，减小了 SEBS 模型气温项输入的不确定性；尝试性简化了其利用区域气候模式输出大气边界层湍流要素场的输入接口，设计了适合 SEBS 模型的新的气象场输入接口；添加了日净辐射总量计算模块，使 SEBS 成为用于计算中国复杂陆面日时间尺度蒸散发的遥感模型 SEBS-China。最后根据地面数据对模型进行调试和修正。

三、模拟结果的验证和分析

首先从总体平均上进行长白山试验区 ET 对比，模拟的试验区 1991~1999 年近 10 年的蒸散发年平均值为 437mm，总体上可以认为 SEBS-China 模型对该试验区的模拟结果是合理的；然后在全国范围选取典型闭合流域进行蒸散发量验证，本文统计了中国黄河流域、长江流域、海河流域、辽河流域、珠江流域 5 个流域近 10 年年均陆面蒸散发量，并将 SEBS-China 模拟的三期结果与其进行对比，发现仅黄河流域的模拟—实测值之差较大，而其余 4 个流域的误差比较小，效果较好。同时对我国近 10 年陆面蒸散量现况进行了分析：1991 年、1995 年和 1999 年全国平均蒸散量分别为 $593\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $650\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $548\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ，在此基础上，展开此三年不同土地覆盖类型、不同自然区和不同行政区 ET 的定量对比分析；此外分析了与 1991~1999 年土地利

用时空格局演变相对应的陆面 ET 时空格局演变,并以逐月的模拟数据分析了 ET 的年内和年际间变化规律,以不同纬度带、经度带、高程带和气候带的模拟数据分析了 ET 的空间分布规律以及不同年际间的差异。

四、敏感性分析

对于陆面 ET 来说,其参数敏感性规律与蒸发比基本一致,地表温度、比辐射率、气温、风速、气压、湿度是模型敏感因素,从不同土地利用类型的平均陆面 ET 情景分析看,耕地、林地和城镇用地的平均陆面 ET 几乎对所有参数都比较敏感,尤其是地表温度、比辐射率、气温、风速、气压。而全国草地和未利用土地的平均陆面 ET 对各参数的敏感性相对都较低,尤其是 NDVI、反照率、比辐射率、粗糙度长度、湿度、日均气温、日均水汽压。

关键词: 中国; 陆面蒸散发; 遥感模型; SEBS 模型; 时空格局; 敏感性分析

Abstract

Land-surface Evapotranspiration (LET) is very important for water cycle, and is determinant for the estimation of water and heat transfer in the Soil-Plant-Atmosphere Continuum (SPAC). Quantitative estimation of LET is the base of appraising terrestrial NPP, regional water consumption, soil water transport, crop production, and land use/land planning. Especially, quantitative estimation of LET is important for the study on global or regional climate change.

This study aims to simulate China' s LET of the year 1991, 1995 and 1999 by means of quantitative remote-sensing methods. It is a great challenge in so large-scale area of the whole China, for there are very complex terrains, various climate zones and diversiform land use/land cover. In order to achieving this research purpose better, the first step is simulation and analysis of China' s LET, however, this study lays particular emphasis on analyzing the uncertainty of relevant key parameters of remote-sensing models for simulating LET, trying to grasp and understand physics mechanism of remote-sensing estimation of large space-time scale LET, and build widely applicable remote-sensing mode for simulating regional actual LET of non-uniform lands. According to this research purpose, we collected and processed

relevant meteorological data, remote-sensing images, soil & vegetation data and ground validation information of the year 1991 to 1999, and on the basis of improving the remote sensing model of SEBS, we used this model to estimate China's LET of every 10-day of about the year 1991, 1995 and 1999. And quantitative analysis for the LET patterns of space-time distribution of the three years was completed, including the sensitivity analysis of the influence factors of SEBS. The main progresses that this research has made are summarized as follow:

(1) Processing data

Data are the foundation of research work, for the quality of the data is an important factor of influencing the simulation result. According to the needs of the model and actual research, we have finished the collection and treatment of the data. The relevant materials and data mainly include: about 1200 NOAA-AVHRR 8km images, ground data (including measurement, observation or experimental data), background documents and historical materials. We made a data standardized treatment based on unified form to NOAA-AVHRR products, meteorological data, 1km land use/land cover (LUCC) grid data.

(2) Improving SEBS model

According to regional actual characteristics of China, we has improved and supplemented original SEBS model. First, setting up a look-up table of momentum roughness length (z_0) and zero plane displacement (d_0) changing with different seasons, based on various classifications of LUCC; Second, building several experiential air-temperature relations with surface temperature, and obtaining air temperature directly by utilizing the re-

remote-sensing data, which will reduced some uncertainty input of SEBS model; Third, trying to simplify meteorological variables input of atmospheric boundary layer that are processed by coupling some regional area climate models, and designed a new input interface of key meteorological field adapted to SEBS model; Then adding a simulating module for total amount of daily net radiation. Through all improvement to SEBS, the new SEBS will be used to estimate daily LET of China, so-called remote-sensing model of SEBS-China. Last, Debugging and revising were done to the SEBS-China model based on the ground data.

(3) Simulating ET and result analysis

We selected the experimental area of Changbai Mountain to do an overall mean LET contrast to observation result, and the simulation result of annual LET of 1991 – 1999 is about 437 mm, which is rational result to this experimental area using SEBS-China model; Then we chose 5 typical close-basins (Yellow river, Changjiang river, Haihe river, Liaohe river, Zhujiang river) of China to verify LET of the whole country, through the observation result statistics of average annual LET of past 10 years, we found only the average annual LET simulation value of Yellow River is much bigger than the observation result relative to other 4 basins, whose errors are less. Generally, the results is good. We also analyzed the current situation of LET of the past 10 years: $593 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ for 1991、 $650 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ for 1995 and $548 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ for 1999. On this basis, we studied LET comparison of different land cover types, natural zones and administrative districts of three years above, and analyzed the LET space-time patterns corresponding to LUCC patterns of 1991 – 1999. We also

analyzed the LET change trend within and among the years above by every monthly simulation results, and the spatial change of LET has been evaluated against latitude, longitude, altitude and climate zones, including the difference among the study years.

(4) Sensitivity analysis

The study showed LET sensitivity to relevant parameters is the same as evaporative fraction. The sensitivity parameters of LET include surface temperature, emissivity, air temperature, wind speed, atmospheric pressure, air humidity. According to average LET scenario analysis of different LUCC, LET of cultivated land (arid land & paddy field), woodland and resident area is more sensitive to all parameters, especially surface temperature, emissivity, air temperature, wind speed, atmospheric pressure. To the whole country, grassland and unused land, their model sensitivity is relatively low, especially NDVI, albedo, emissivity, momentum roughness length (z_0), humidity, average daily temperature and average daily vapor pressure.

Keywords: China; Land-Surface Evapotranspiration (LET);
Remote Sensing Model; SEBS Model;
Space-Time Pattern; Sensitivity Analysis

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 研究意义和目的	1
1.1.1 陆地水文过程及其关键环节	1
1.1.2 国际前沿研究重点	3
1.1.3 应用研究需要	6
1.1.4 研究目的	7
1.2 国内外研究进展	8
1.2.1 研究综述	8
1.2.2 面临的主要问题	19
1.3 研究思路和内容	22
1.3.1 研究思路和内容	22
1.3.2 创新点	24
第2章 模型方法和数据处理	37
2.1 SEBS 模型介绍	37
2.1.1 SEBS 框架	37
2.1.2 SEBS 组成与结构	39
2.2 日蒸散发量计算	52
2.2.1 日净短波辐射计算	54
2.2.2 日净地表长波辐射计算	56
2.2.3 日地表净辐射计算	58

2.2.4	日蒸散发量计算	59
2.3	SEBS 模型在中国应用的不足和改进	59
2.3.1	动量粗糙度和零平面位移	60
2.3.2	参考高度处大气温度	61
2.3.3	建立参考高度处气象场	64
2.4	数据的收集和处理	65
2.4.1	数据的收集	65
2.4.2	数据的处理	67
	本章小结	71
第3章	中国陆面蒸散发模拟	79
3.1	陆面参数的反演	80
3.1.1	地表温度	81
3.1.2	归一化植被指数	83
3.1.3	地表比辐射率及覆盖率	84
3.1.4	地表反照率	85
3.1.5	陆面参数反演流程	86
3.1.6	个例分析	87
3.2	SEBS-China 运行和验证	92
3.2.1	数据的输入和模型的运行	92
3.2.2	运行结果的验证	93
3.3	中国陆面蒸散发量的估算	98
3.3.1	日蒸发比模拟	98
3.3.2	日净辐射总量模拟	100
3.3.3	中国陆面蒸散发量总况	102
3.3.4	不同土地覆被类型的 ET	106
3.3.5	中国行政区的蒸散分布状况	113
	本章小结	117

第 4 章 中国陆面蒸散发时空分布规律	123
4.1 中国陆面 ET 和 NDVI 的年内变化规律	124
4.1.1 NDVI 的年内变化规律	124
4.1.2 ET 的年内变化规律	128
4.2 中国陆面 ET 年际间变化规律	132
4.3 中国陆面 NDVI 和 ET 的空间分布规律	145
4.3.1 空间分布特点及变化趋势	145
4.3.2 纬向分布规律	146
4.3.3 经向分布规律	148
4.3.4 垂直分布规律	151
4.4 不同气候带的 NDVI 和 ET 的分布规律	153
本章小结	157
 第 5 章 陆面 ET 的影响因子敏感性分析	159
5.1 蒸发比的影响因子敏感性分析	160
5.1.1 NDVI 对蒸发比的影响	162
5.1.2 反照率对蒸发比的影响	165
5.1.3 比辐射率对蒸发比的影响	165
5.1.4 地表温度对蒸发比的影响	166
5.1.5 粗糙度长度对蒸发比的影响	166
5.1.6 气候因素对蒸发比的影响	167
5.2 陆面 ET 的影响因子敏感性分析	169
5.2.1 NDVI 对陆面 ET 的影响	170
5.2.2 反照率对陆面 ET 的影响	170
5.2.3 比辐射率对陆面 ET 的影响	176
5.2.4 地表温度对陆面 ET 的影响	176
5.2.5 粗糙度长度对陆面 ET 的影响	177
5.2.6 气候因素对陆面 ET 的影响	177

本章小结	181
第 6 章 结论与展望	183
6.1 主要的研究工作	183
6.1.1 数据的处理	183
6.1.2 模型的改造	183
6.1.3 模拟结果的验证	184
6.1.4 敏感性分析	184
6.2 主要研究结论	184
6.2.1 中国陆面 ET 总况	184
6.2.2 中国陆面 ET 时空格局变化	186
6.2.3 中国陆面 ET 的影响因子敏感性分析	187
6.3 本研究存在的不足与展望	187
6.3.1 研究中存在的不足	187
6.3.2 研究工作展望	188

第1章 绪 论

水分蒸发是自然界最常见的现象，是其消耗一定能量从液态转变为气态的过程。单位质量的液态水全部蒸发完变为水汽所需消耗的热量称为蒸发潜热，潜热随温度的变化很小，一般可视为常数，水在相变过程中，所伴随的潜热转化是大气中能量传输的方式之一，它对云、雾、降水的形成和发展以及其他天气现象的产生都具有重要意义。水分蒸发不仅是地球表面水分循环的重要环节之一，同时也是地表与大气之间能量转移的重要组成部分，许多气候模式试验表明，气候对陆地表面蒸发的变化是很敏感的。计算地表实际蒸发对许多学科都有重要意义，尤其受到气候学、水文学、生态学等领域的重视。遥感作为一种新兴技术手段，发展迅速，遥感技术与传统学科相结合，形成了许多交叉学科领域，为解决诸多科学和应用问题带来了全新的方案，发挥着不可替代的作用。本文所要论述和研究的题目——用遥感方法定量计算中国陆面蒸散发量，就是这样一个跨学科的前沿性课题。

1.1 研究意义和目的

1.1.1 陆地水文过程及其关键环节

陆地水文过程是联系地球表层系统水、土、气多种要素变化的纽带，它由“土壤—植被—大气”界面过程、坡面水文过程、

河流水动力学过程、流域水循环过程等多个环节组成(夏军等, 2002)。其通过下垫面的蒸散发向大气输送水汽直接影响降水、大气温度和大气运动等天气、气候状况, 蒸散发(ET)既包括从地表和植物表面的水分蒸发, 也包括通过植物表面和植物体内的水分蒸腾(Burman and Pochop, 1994), Rosenberg等(1983)指出降落到地球表面的降水有70%通过蒸发或蒸散作用回到大气中, 在干旱区这个数据达到90%, 可见蒸散发是陆面水文过程中极其重要的分量。蒸发过程涉及大气边界层中的湍流扩散机制, 是一个复杂的学术问题, 虽然对自由水面的蒸发人们了解得比较清楚, 并且可以把部分结果推广应用到饱和土壤表面或湿润茂密的植被表面, 然而, 对非饱和表面的自然蒸发, 目前实质性进展不大。

裸土蒸发、植被蒸散、土壤水传输、排水和径流决定了陆面过程中的水分收支, 是陆面水文过程所要描述的重要组成部分。陆面模式中对裸土蒸发的计算主要指实际蒸发, 并假定实际蒸发与潜在蒸发成一定的比例关系。在目前陆面模式中潜在蒸发的计算方法主要有3种: ①大气动力学阻抗法: CLM(Keith等, 2004)、BATs(Dickinson等, 1986)、BUCKET(Manabe, 1969)、LAPS(Mihailovic, 1996)、PLACE(Wetzel and Boone, 1995)、SSIB(Xue等, 1991)等模式采用了此方法计算可能的蒸发; ②Penman-Monteith方程: CSIRO9(Kowalczyk等, 1991)、BGC(Running and Hunt, 1993)、VIC(Liang等, 1994)、CENTURY(Parton, 1993)等模式采用了该方法; ③Priestley-Taylor方程: 模式BIOME2(Haxeltine等, 1996a; 1996b)采用了此方法。另外, 大多数陆面模式在处理植被蒸散时都考虑了两部分: 冠层叶面截流的蒸发和叶面蒸腾。纵观陆面模式从简单的Bucket模型到复杂的CLM、BATs、SiB2(Sellers等, 1996)等生物模型, 由于陆表覆盖(植被、土壤)具有高度的非均匀性, 目前对

蒸散发过程大尺度行为的描述还缺乏一种行之有效的方法。非均匀性问题、尺度问题、参数确定问题将是目前和今后的研究重点(苏凤阁等, 2001)。

1.1.2 国际前沿研究重点

陆面蒸散发是水文循环的关键一环, 决定了土壤—植被—大气系统中的水、热传输, 属于国际水科学前沿课题之一。从国际水文科学研究与进展而言, 特别是 20 世纪 90 年代以后, 联合国教科文组织 (UNESCO)、国际科学联盟理事会 (ICSU)、国际水文科学协会 (IAHS) 和世界气象组织 (WMO) 等实施了一系列国际水科学计划, 如国际水文十年 (IHD)、国际水文计划 (IHP)、世界气候研究计划 (WCRP)、全球能量和水循环试验项目 (GEWEX)、国际地圈生物圈计划 (IGBP)。IGBP 是国际地球科学交叉研究重大的科学计划之一, 代表了世界地球科学发展的前沿和趋势, 其核心项目“水文循环的生物圈方面”(IGBP-BAHC) 是专门研究水与生态作用规律的科学计划, 受到国际地球科学、水文科学、生态科学的广泛注目和国际性参与。当今, IGBP 的前沿问题更加突出了与人类生存和发展密切联系的基础科学和需求问题, 即“碳循环、水循环和食物纤维”问题, 将深入开展 CO_2 和 H_2O 的通量研究。

1.1.2.1 国际地圈生物圈计划

水文循环是联系地球系统地圈—生物圈—大气圈的纽带。一个区域的水文循环规律及其变化决定了该地区水资源的多少。因此, 水文循环科学研究是水资源评价、水资源持续利用的重要基础。传统水循环只考虑水量的自然变化, 现代水文循环则需要考虑地球生物圈、全球变化以及人类活动等方面的影响。IGBP 代表世界地球科学发展的前沿, 而 BAHC 是 IGBP 的核心项目之一。BAHC 着眼于科学解释: 植被是如何与水文循环的物理过