

文章编号: 1007-4619(2006)04-0542-06

青藏高原非均匀地表区域能量通量的研究

马耀明^{1, 2}, 仲 雷¹, 田 辉², 孙方林², 苏中波³, Massimo Menenti⁴

(1. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100085; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;

3. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation 7500 AA Enschede The Netherlands

4. Laboratoire des Sciences de l'Image de l'Informatique et de la Télé-détection (LSIT),

Université Louis Pasteur Strasbourg 67400 Illkirch France)

摘 要: 卫星遥感在研究青藏高原非均匀地表区域能量通量和蒸发(蒸散)量时有其独到的作用。本文介绍了基于 NOAA-14 AVHRR 和 Landsat TM 资料推算藏北高原地区区域地表特征参数、植被参数及区域地表热通量的方案, 并将其用于 GAME/Tibet(全球能量水循环之亚洲季风青藏高原试验研究)和 CAMP/Tibet(“全球协调加强观测计划(CEOP)亚澳季风之青藏高原试验研究”)试验区。并指出了此方法估算青藏高原非均匀地表区域地表能量通量和蒸发(蒸散)量时存在的难点问题和解决问题的可能途径。

关键词: 青藏高原; 非均匀地表; 区域地表能量通量; Landsat TM; NOAA /AVHRR

中图分类号: X87/TP79 **文献标识码:** A

Study on the Regional Land Surface Heat Fluxes over Heterogeneous Landscape of the Tibetan Plateau Area

MA Yao-ming^{1, 2}, ZHONG Lei¹, TIAN Hui², SUN Fang-lin², SU Zhong-bo³, Massimo Menenti⁴

(1. Institute of Tibetan Plateau Research Chinese Academy of Sciences Beijing 100085, China;

2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute Chinese Academy of Sciences Gansu Lanzhou 730000, China;

3. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation 7500 AA Enschede The Netherlands

4. Laboratoire des Sciences de l'Image de l'Informatique et de la Télé-détection (LSIT),

Université Louis Pasteur Strasbourg 67400 Illkirch France)

Abstract For studying on the regional land surface heat fluxes over inhomogeneous landscape of the Tibetan Plateau area, the utilization of satellite remote sensing is indispensable. In this study, methods based on NOAA-14 AVHRR and Landsat TM are introduced and tested for deriving the regional land surface variables, vegetation variables and surface heat fluxes over inhomogeneous landscapes of the GAME/Tibet (GEWEX (Global Energy and Water cycle Experiment) Asian Monsoon Experiment on the Tibetan Plateau) area and the CAMP/Tibet (CEOP (Coordinated Enhanced Observing Period) Asia-Australia Monsoon Project (CAMP) on the Tibetan Plateau) area. Difficulties on the determination of regional land surface heat fluxes over heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau by using the methods are introduced and the solving way to the difficulties is also proposed in this paper.

Key words: Tibetan Plateau; heterogeneous landscape; regional land surface heat fluxes; Landsat TM; NOAA /AVHRR

收稿日期: 2005-08-15; 修订日期: 2005-10-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2005CB422003)、中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX3-SW-231 和 KZCX3-SW-339) 和国家自然科学基金 (40520140126) 共同资助

作者简介: 马耀明 (1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 2001 年于日本国立冈山大学获博士学位。主要从事大气边界层观测试验和卫星遥感应用研究。E-mail: ymm@ipc.as.ac.cn

1 引言

青藏高原约占中国领土 1/4, 平均海拔 4000m 以上, 是世界上平均海拔最高、面积最大、地形最为复杂的高原。青藏高原高大的地形特征和高原地面所吸收的太阳辐射能, 使得该地区地气相互作用过程, 尤其是能量与水分循环过程对亚洲季风、东亚大气环流及全球气候变化均有极大的影响。所以“全球能量水循环之亚洲季风青藏高原试验研究”(GAME/Tibet)和“全球协调加强观测计划(CEOP)亚澳季风之青藏高原试验研究”(CAMP/Tibet)都把研究青藏高原地表与大气之间能量交换作为其首要的科学目标提了出来。到目前为止, 有关试验区地表能量和水循环的研究已经得到了一些非常有意义的结果^[1-9], 但是这些结果都只是处于“点”或局地的水平上。要想达到真正理解地表状况十分复杂的这一地区地气相互作用的实质, 其研究仅仅停留在“点”上或局地的水平是不够的, 而必须把这些结果推广到整个区域上。

估算青藏高原非均匀地表区域上能量通量和蒸发(蒸散)量的分布有两种方法: 数值模拟和卫星遥感参数化, 而相比较而言, 卫星遥感参数化又是较好的方法^[10]。本文的目的就是利用卫星遥感资料(NOAA-14 AVHRR 和 Landsat TM), 推算试验区地表特征参数(地表反射率和地表温度)、植被参数(NDVI修正的土壤调整植被指数 MSAVI、植被覆盖度和叶面指数 LAI)和区域地表热通量(净辐射通量、土壤热通量、感热通量和潜热通量)分布, 进而为更加清楚地理解试验区甚至整个青藏高原地区地气相互作用的实质打下良好基础。

2 GAME/Tibet和 CAMP/Tibet试验

GAME/Tibet试验区设在藏北那曲地区的一个 150km×200km 的区域内, 同时在青藏公路沿线的 D66、沱沱河和唐古拉山口(D105)也建立了观测点。在包括高原草甸、高原湖泊、荒漠化草原等不同下垫面上, 设置了以下观测站(点): (1)两个包括大气和土壤的多学科综合观测站(Anduo和 NaquFx)。这两个站含有多分量辐射观测系统、梯度观测塔、湍流量直测系统、土壤温湿度梯度观测、无线电探空以及作为卫星资料地面真值利用的地面土壤湿度观测网和多角度光谱仪观测等; (2)6个自动气象站

(D66、沱沱河、D105、D110、Naqu和 MS3608)。每站都有风、温、湿、压、辐射、地表温度、土壤湿度和降水等测量; (3)设在那曲北和南各约 80km 处的 PAM (Portable Automated Mesonet)站, 含有类似于上述两个综合观测站(Anduo和 NaquFx)的主要项目, 同时有风温湿的湍流观测; (4)9个土壤温度和湿度观测点(D66、沱沱河、D110、WADD、NODA、Anduo、MS3478、MS3478和 MS3637), 每站都包含有 6层土壤温度和 9层土壤湿度测量; (5)一个设在那曲以南的三维多普勒雷达站和邻近(约 100km)区域内的 7个加密雨量站, 辐射观测系统, 主要研究高原云与降水系统, 并作为 TRMM 卫星一个地面真值站。

GAME/Tibet项目 1997年夏季在安多(Amdo)站作过短期预试验观测(PIOP)。1998年 5—9月, 在整个试验区安排了连续 5个加强观测期(IOP), 每个 IOP约一个月。中、日、韩三国共 80余名科学工作者分批赴青藏高原, 进行了艰苦而卓有成效的工作, 各项观测试验计划顺利完成。并且从 1998年 9月加强观测结束后, 5个自动气象站(AWS)、一个边界层塔及辐射综合观测站(Amdo)及 9个土壤温度和湿度观测站一直连续观测至今, 取得了连续 8年零 3个月(从 1997年 6月开始)极其珍贵的资料。

GAME/Tibet项目 2000年结束后, 即刻加入了 GEWEX(全球能量和水循环试验)与 CLIVAR(气候变化和预测)两个大型国际计划联合组织的“全球协调加强观测计划(CEOP)”, 开始执行 CAMP/Tibet。CAMP/Tibet与 GAME/Tibet试验区相同, 除了继续 GAME/Tibet观测项目外又增加了 4个自动气象站(D105、MS3478、BJ和 ANNI)、1个微波辐射计(BJ)、1个风温廓线仪(BJ)、2个湍流观测塔(BJ和 ANND)、1个激光雷达(BJ)和 2个深层土壤温度测量系统(NagquRS和 D105)等仪器。2002年 6月和 8月进行了预试验观测(PIOP), 加强自动观测(EAOP)已于 2002年 10月 1日开始, 并在 2003年和 2004年分别安排 2个加强观测期(IOP), 每个 IOP约 5个月, 加强自动观测(EAOP)已于 2004年 9月 30日结束。目前绝大部分仪器仍在连续观测。

3 卫星遥感资料和地面观测资料的选取

NOAA-14 AVHRR 资料包含 5个波段(0.58—0.68 μm 、0.73—1.10 μm 、3.55—3.93 μm 、10.3—11.3 μm 和 11.5—12.5 μm)的信息, 其地面分辨率

约为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 。本文选取 1998 年 6 月 12 日、7 月 16 日和 8 月 21 日的 AVHRR 资料分别代表 GAME/Tibet 试验区的季风前、季风和季风后的个例。

Landsat-7 TM 包含 7 个波段的信息,其可见光波段(波段 2 和 3)及近红外波段(波段 4、5 和 7)的地面分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$,热红外波段(波段 6)的地面分辨率为 $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ 。本文选取 2002 年 6 月 9 日(季风前)的 Landsat-7 TM 资料代表 CAMP/Tibet 试验区的个例,而且可以与 NOAA/AVHRR 资料推算的季风前 1998 年 6 月 12 日的结果比较。卫星过境时试验区天气晴好。

结合卫星遥感分析,本文选取的地面观测资料包括地表辐射平衡各分量(向下的短波辐射、反射辐射、向下的长波辐射和向上的长波辐射)、地表温度、地表反射率、风温湿廓线(由边界层塔、声雷达、无线电探空仪及系留气球等测得)、由涡旋相关法测得的湍流通量、土壤热通量、土壤温湿度廓线以及植被状况等。

4 参数化方案及结果

4.1 利用 NOAA/AVHRR 资料估算青藏高原非均匀地表区域能量通量

本节主要介绍利用 NOAA-14/AVHRR 资料估算非均匀地表区域能量通量的方法,以及在 GAME/Tibet 试验区取得的一些结果。

在利用 NOAA/AVHRR 资料研究非均匀地表区域能量通量和蒸发(散)方面,中国的许多科学家做了大量的卓有成效的工作。钟强、魏丽和吴艾笙等由 AVHRR 资料推算得到了非均匀地表的反射率、植被指数及亮温等^[11-16]。田国良、郑柯用 NOAA/AVHRR 资料和地面气象站资料估算作物蒸散和土壤含水量^[17]。陈乾和陈天宇提出了一种由 NOAA/AVHRR 资料、海拔高度和气象观测数据估算江河流域复杂地形上的蒸散量的方法^[18]。马耀明(Ma)等提出了一种 NOAA-14/AVHRR 资料结合地面观测推算非均匀地表区域能量通量的参数化方案^[19-21]。此方案分两步:第一步,由 NOAA-14/AVHRR 资料和地面观测资料,通过辐射传输 MODTRAN 模式^[22],求得区域上的地表参数(地表温度和地表反射率)和植被参数(NDVI 植被覆盖度、调整土壤植被指数 MSAVI^[23]和叶面指数 LAI);第二步,利用已求得的地表参数和植被参数推算出区域上地表能量通量(净辐射通量、土壤热通量、感

热通量和潜热通量)。

利用 Ma 等提出的参数化方案^[19-21]、NOAA-14 AVHRR 资料与地面观测资料,得到了 GAME/Tibet 试验区的地表能量通量分布。结果显示:(1)推算得到的地表温度、地表反射率、NDVI 修正的土壤调整植被指数 MSAVI 植被覆盖度 P_v 、叶面指数、净辐射通量、土壤热通量、感热和潜热通量等与试验区的地表状况相吻合。由于在试验区既有高原草甸和山体,又有湖泊和荒漠化的草原,所以各个量的分布范围也比较宽。(2)推算得到的试验区的地表反射率、地表温度、净辐射通量、土壤热通量和感热通量,不论是在季风前(6 月 12 日)、季风中(7 月 16 日)还是季风后(8 月 21 日)都与地面观测值较为接近,平均绝对百分比误差(MAPD)都小于 10.0% (图 1)。(3)青藏高原地区的净辐射通量大于 HEIFE 地区。这是由高原地区的高海拔(向下的短波辐射大)和高植被覆盖度(向上的长波辐射小)所决定的。例如,HEIFE 地区 7 月 9 日的区域平均净辐射通量为 470 W/m^2 ,而 GAME/Tibet 试验区 7 月 16 日的区域平均净辐射通量为 750 W/m^2 。(4)季风前(6 月 12 日)试验区的地表反射率、地表温度、土壤热通量和感热通量均大于季风中(7 月 16 日)和季风后(8 月 21 日)的值,而季风前(6 月 12 日)试验区的净辐射通量和潜热通量均小于季风中(7 月 16 日)和季风后(8 月 21 日)的值,这是由于季风前地表干燥,而季风和季风后地面潮湿并且高原草场正处于生长期之故。(5)基于 MSAVI 的估算区域土壤热通量方法对青藏高原地区非均匀下垫面是适用的,其平均绝对百分比误差(MAPD)小于 10.0% (见图 1),而且明显好于基于 NDVI 的估算区域土壤热通量方法的结果。(6)由于推算的潜热通量是基于地表能量平衡基础上得到的,而实际上由于观测误差的存在,使得地表能量通量在地面观测的水平上显得“不平衡”^[1,2,5-7,21],因此除了在 NPAM 站的 6 月 12 日,推算的潜热通量与观测值接近之外,其他站点和时次的推算值与观测值相差都较大(见图 1)。

4.2 利用 Landsat-7 TM 资料估算非均匀地表区域能量通量

本节主要介绍利用 Landsat-7 TM 资料估算非均匀地表区域能量通量的方法,以及在 CAMP/Tibet 和 GAME/Tibet 试验区的应用。

马耀明(Ma)等和 Wang 等在利用 Landsat TM 资料研究非均匀地表区域能量通量和蒸发(散)方

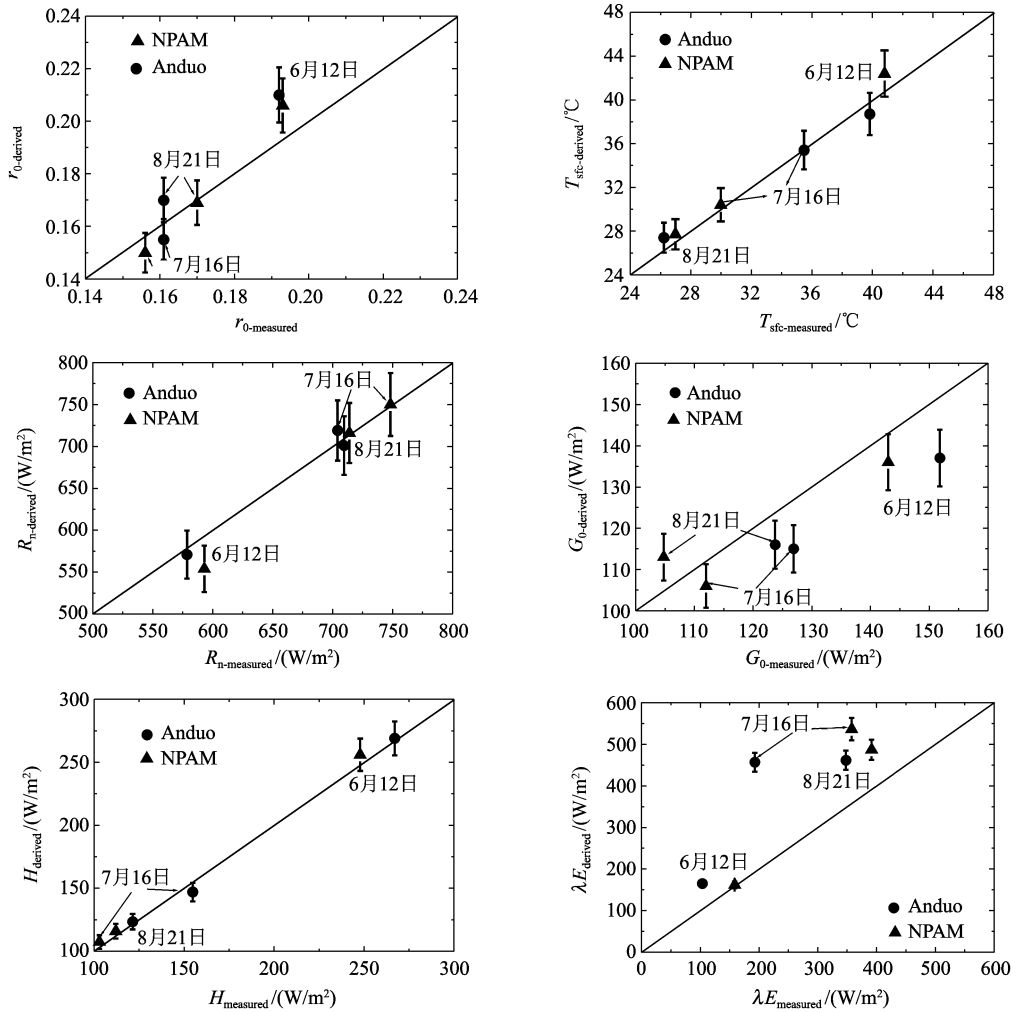


图 1 GAME/Tibet 试验区推算得到的地表热通量与实测值比较

Fig 1 Comparison of the derived results against the field observation for surface reflectance surface temperature and land surface heat fluxes over the GAME/Tibet area together with 1:1 line

面做了大量的工作^[24-28]。马耀明(Ma)等在改进前人方案和自己研究的基础上提出了一种比较合理的利用 Landsat TM 资料结合地面观测推算区域地表能量通量的参数化方案^[26, 28](图 2)。此方案分两步:第一步,由 Landsat TM 资料和地面观测资料,通过辐射传输 MODTRAN 模式^[22],求得区域上的地表参数(地表温度和地表反射率)和植被参数(NDVI, 植被覆盖度、调整土壤植被指数 MSAVI^[23]和叶面指数 LAI);第二步,利用已求得的地表参数和植被参数推算出区域上地表能量通量(净辐射通量、土壤热通量、感热通量和潜热通量)(图 3)。

利用 Ma 等提出的参数化方案^[26-28]、2002 年 6 月 9 日的 Landsat TM 资料与地面观测资料,得到了 CAMP/Tibet 试验区的地表能量通量分布。结果显示:推算得到的试验区地表温度、地表反射率、

NDVI 修正的土壤调整植被指数 MSAVI, 植被覆盖度 P_v、叶面指数、净辐射通量、土壤热通量、感热和潜热通量等与试验区的地表状况相吻合。由于在

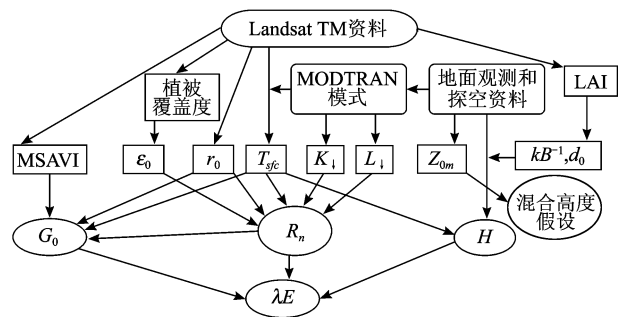


图 2 Landsat-7 TM 资料结合地面观测

确定地表热通量参数化方案

Fig 2 Diagram of parameterization of procedure by combining Landsat TM with field observations

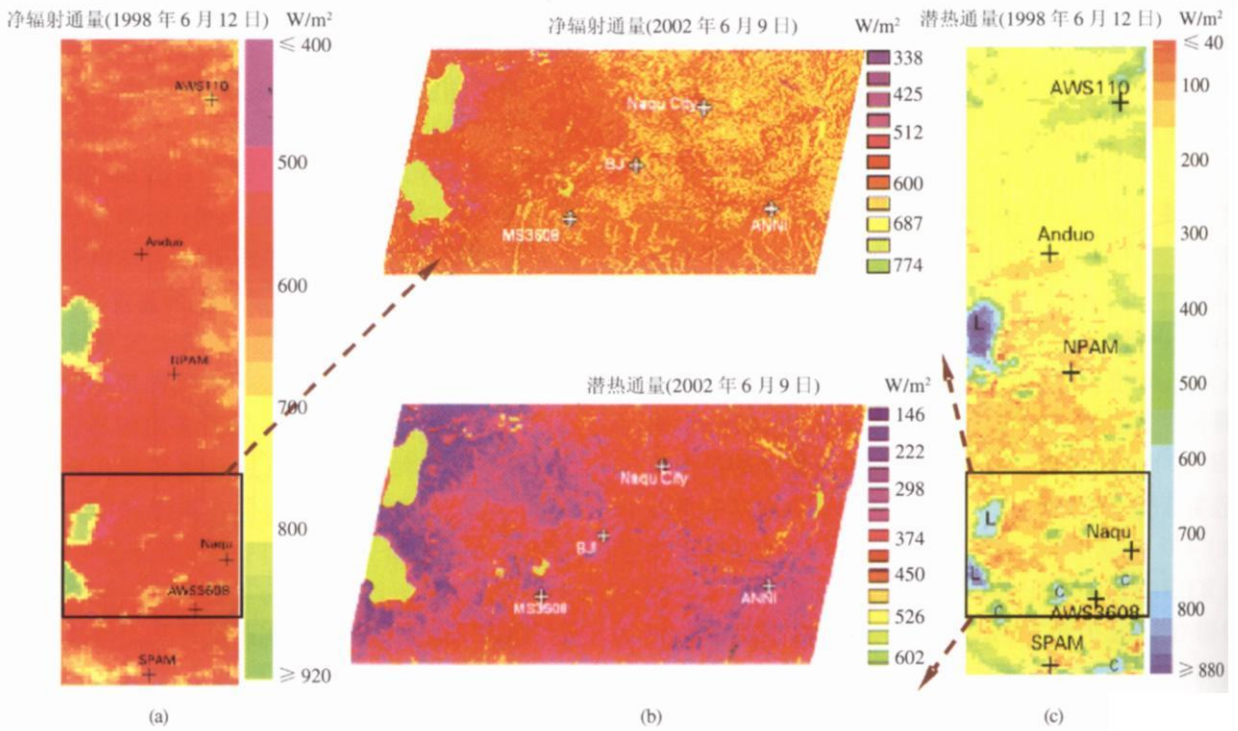


图 3 GAME/Tibet与 CAMP/Tibet试验区地表热通量分布

(a)、(c) GAME/Tibet试验区; (b) CAMP/Tibet试验区

Fig 3 The distributions of land surface heat fluxes for the Tibetan Plateau area

(a) and (c) GAME/Tibet area; (b) CAMP/Tibet area

试验区既有高原草甸和山体,又有湖泊和荒漠化的草原,所以各个量的分布范围也比较宽。

5 结 论

利用卫星遥感与地面观测相结合的手段可以得到非均匀下垫面上的区域地表特征参数(地表温度和地表反射率)、植被参数(NDVI校准后的土壤调整植被指数MSAVI、植被覆盖度 P_v 和叶面指数LAI)和地表热通量(净辐射通量 R_n 、土壤热通量 G_0 、感热通量 H 和潜热通量 λE)。本文在回顾这方面研究进展的同时,着重介绍了Ma等所提出的两个新参数化方案以及它们在干旱区(HEIFE试验区和DHEX试验区)和青藏高原地区(GAME/Tibet试验区)的非均匀下垫面上的应用结果。

确定非均匀下垫面上的区域能量通量是一个非常意义但又是一个较为困难的问题。利用卫星遥感与地面观测相结合的手段不失为一种较为有效的途径,但在在这方面又有很长的路要走。

授、冈山大学 O Tsukamoto教授及荷兰 Wageningen 大学 P. Henk博士和 R. Gerbert博士对本文的全力支持。文中所用 Landsat TM 资料由中国科学院卫星地面站提供。

参 考 文 献 (References)

[1] Ma Y M, Tsukamoto O, Wu X M, et al Characteristics of Energy Transfer and Micrometeorology in the Surface Layer of the Atmosphere above the Grassy Marshland of the Tibetan Plateau Area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Physics, 2000, 24 (5): 715-722 [马耀明, 塚本修, 吴晓鸣等. 藏北高原草甸下垫面近地层能量输送及微气象特征 [J]. 大气科学, 2000, 24(5): 715-722]

[2] Tanaka K, Ishikawa H, Hayashi T, et al Surface Energy Budget at Amdo on Tibetan Plateau using GAME/Tibet JOP'98 Data [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2001, 79 (1B): 505-517.

[3] Ma Y M, Tsukamoto O, Wang J M, et al Analysis of Aerodynamic and Thermodynamic Parameters over the Grassy Marshland Surface of Tibetan Plateau [J]. Progress in Natural Sciences, 2002, 12(1): 36-40.

Gao Z Q, Bian L G, Wang J X, et al Discussion on Calculation Methods of Sensible Heat Flux during GAME/Tibet 1998 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(3): 357-368.

致 谢 作者非常感谢京都大学 H. Ishikawa教

- [5] Ishikawa H, Tsukamoto O, Hayashi T, et al. Summary of the Boundary Layer Observation and the Preliminary Analysis [A]. Third International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle [C]. Beijing, China, 16-19 June 1999.
- [6] Ma Y M, Tsukamoto O, Wang J M, et al. Transfer and Micrometeorological Characteristics in the Surface Layer of the Atmosphere above the Tibetan Plateau area [A]. Third International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle [C]. Beijing, China, 16-19 June 1999.
- [7] Wang J M, Kim J, Liou Y A, et al. Energy Balance Analysis and One-Dimensional Simulation of Land Surface Process in a Short-Grass Site of Central Tibetan Plateau [A]. Third International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle [C]. Beijing, China, 16-19 June 1999.
- [8] Yang K, Koike T, Yang D W. Surface Flux Parameterization in the Tibetan Plateau [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, **116**: 245-262.
- [9] Yang K, Koike T, Ishikawa H, et al. Analysis of Surface Energy Budget at a Site of GAME/Tibet Using a Single-Source Model [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, **82** (1): 131-153.
- [10] Ma Y M, Tsukamoto O. Combining Satellite Remote Sensing with Field Observations for Land Surface Heat Fluxes over Inhomogeneous Landscape [M]. Beijing, China: Meteorological Press, 2002.
- [11] Zhong Q. Using Satellite Radiation Data of AVHRR to Calculate Planetary Reflectance and outgoing Long Wave Radiation over the Tibetan Plateau Area [J]. *Plateau Meteorology*, 1984, **3** (2): 1-9. [钟强. 应用 AVHRR 的卫星辐射资料计算青藏高原地区的行星反照率与射出长波辐射 [J]. *高原气象*, 1984, **3** (2): 1-9.]
- [12] Zhong Q, Wu S J. The Method to Calculate Surface Albedo over the Tibetan Plateau Area by using AVHRR Data [J]. *Plateau Meteorology*, 1985, **4** (3): 193-203. [钟强, 吴世杰. 利用 AVHRR 资料推算青藏高原地区地表反射率方法 [J]. *高原气象*, 1985, **4** (3): 193-203.]
- [13] Zhong Q, Li Y H. Satellite Observation of Surface Albedo over Qinghai-Xizang Plateau Region [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1988, **5**: 57-65.
- [14] Wei L, Zhong Q. Using AVHRR Data to Analyze the Surface Characteristics over the Heihe Area [J]. *Plateau Meteorology*, 1989, **8** (3): 189-196. [魏丽, 钟强. 利用 AVHRR 资料分析黑河地区地表特征 [J]. *高原气象*, 1989, **8** (3): 189-196.]
- [15] Wu A S, Zhong Q. The Seasonal Variation of Surface Albedo and Vegetation Index over the Heihe Area [J]. *Plateau Meteorology*, 1992, **11** (4): 440-450. [吴艾笙, 钟强. 黑河地区地表反射率与植被指数的季节变化 [J]. *高原气象*, 1992, **11** (4): 440-450.]
- [16] Wu A S, Zhong Q. Surface Albedo and Vegetation Index over the Heihe Area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Physics*, 1993, **17** (2): 135-162. [吴艾笙, 钟强. 黑河地区地表反射率与植被指数 [J]. *大气科学*, 1993, **17** (2): 135-162.]
- [17] Tian G L, Zheng K. Using NOAA /AVHRR Digital Images and Weather Station Data to Estimate Crop Evapotranspiration and Soil Water [A]. *The Movable Study of Remote Sensing over the Yellow River Basin* [C]. Beijing: Science Press, 1990. [田国良, 郑柯. 用 NOAA AVHRR 数字图像和地面气象站资料估算作物蒸散和土壤水 [A]. *黄河流域典型地区遥感动态研究* [C]. 北京: 科学出版社, 1990.]
- [18] Chen Q, Chen T Y. Estimation of River Basin Evapotranspiration over Complex Terrain Using NOAA AVHRR, Elevation and Meteorological Data [R]. HEIFE Report 6, 1991.
- [19] Ma Y M, Su Z B, Li Z L, et al. Determination of Regional Net Radiation and Soil Heat Flux Densities over Heterogeneous Landscape of the Tibetan Plateau [J]. *Hydrological Processes*, 2002, **16** (15): 2963-2971.
- [20] Ma Y M, Ishikawa H, Tsukamoto O, et al. Regionalization of Surface Fluxes over Heterogeneous Landscape of the Tibetan Plateau Using Satellite Remote Sensing Data [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2003, **81** (2): 277-293.
- [21] Ma Y M, Su Z B, Koike T, et al. On Measuring and Remote Sensing Surface Energy Partitioning over the Tibetan Plateau - From GAME/TIBET to CAMP/TIBET [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, **28** (1-3): 63-74.
- [22] Berk A, Bernstein L S, Robertson D C. MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOTRAN 7 [R]. GL-TR-89-0122, 1989.
- [23] Qi J G, Chehbouni G A, Huete A R, et al. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, **48**: 119-126.
- [24] Ma Y M, Wang J M, Menenti M, et al. Estimation of Flux Densities over Heterogeneous Land Surface with the Aid of Satellite Remote Sensing and Field Observation [J]. *ACTA Meteorologica Sinica*, 1999, **57** (2): 180-189. [马耀明, 王介民, Menenti M 等. 卫星遥感结合地面观测估算非均匀地表区域能量通量 [J]. *气象学报*, 1999, **57** (2): 180-189.]
- [25] Wang J M, Ma Y M, Menenti M, et al. The Scaling up of Processes in the Heterogeneous Landscape of HEIFE with the Aid of Satellite Remote Sensing [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1995, **73** (6): 1235-1244.
- [26] Ma Y M, Tsukamoto O, Ishikawa H, et al. Determination of Regional Land Surface Heat Flux Densities over Heterogeneous Landscape of HEIFE Integrating Satellite Remote Sensing with Field Observations [J]. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 2002, **80** (3): 485-501.
- [27] Ma Y M, Tsukamoto O, Ishikawa H. Remote sensing Parameterization of Energy and Water Cycle over Desertification Areas [J]. *Science in China (D)*, 2002, **45** (Supp): 47-53.
- [28] Ma Y M, Wang J M, Huang R H, et al. Remote Sensing Parameterization of Land Surface Heat Fluxes over Arid and Semi-Arid Areas [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20** (4): 530-539.