

文章编号:1006 - 7639(2003) - 03 - 0034 - 09

西北干旱区及高原上卫星遥感非均匀 地表区域能量通量研究

马耀明,李茂善,马伟强,王介民

(中国科学院寒区旱区环境工程研究所,甘肃 兰州 730000)

摘要:介绍了目前利用 Landsat TM 和 NOAA/ AVHRR 遥感资料进行非均匀地表区域地表能量通量和蒸发(蒸散)量研究的进展和存在的难点问题,并提出了解决问题的可能途径。

关键词:非均匀地表;区域地表能量通量;卫星遥感;Landsat TM;NOAA/ AVHRR

中图分类号:P412.27

文献标识码:A

引言

气候变化及其预测研究是近 20 多年来国内外大气和地理科学家共同关注的重大课题。一般认为,对陆气相互作用了解得不够充分是当前影响天气和气候模式预报效果的主要原因之一。因此自上世纪 80 年代中期开始,在 WCRP 和 IGBP 的协调组织下,世界各国开展了一系列大型陆面过程实验。据最新的不完全统计表明,这些实验总数已超过 50 个^[1]。其中在我国进行的大型陆面过程实验主要有:国家自然科学基金和中国科学院重大项目“黑河地区地气相互作用野外观测实验研究”(HEIFE, 1989~1994 年),国家自然科学基金重大项目“内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用研究”(IMGRASS, 1997~2000 年),中日合作研究项目“全球能量水循环亚洲季风之青藏高原实验”(GAME/ Tibet, 1996~2000 年),国家攀登项目“第二次青藏高原科学实验(TIPEX, 1996~2000 年)”,中日合作研究项目“全球协调加强观测计划亚澳季风之青藏高原实验”(CAMP/ Tibet, 2001~2005 年)以及国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气候和天气灾害形成和预测理论的研究”的“敦煌陆气相互作用实验”(DHEX, 1999~2003 年)等。在这些陆面过程实验中,对区域地表能量和水循环的研究

是其最主要的内容之一。

估算非均匀地表区域上能量通量和蒸发(蒸散)量的分布有 2 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^[2]。20 世纪 70 年代后期以来,国内外相继开展了用卫星遥感技术估算区域上地表能量通量和蒸发(蒸散)的研究工作,至今已取得了一系列成果^[2]。本文的目的就是介绍利用 Landsat TM 和 NOAA/ AVHRR 估算非均匀地表区域能量通量的研究进展及存在的问题和解决问题的办法。

1 利用 Landsat 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 TM 资料估算非均匀地表区域能量通量的方法,以及在 HEIFE 实验区和 DHEX 实验区取得的一些结果。

1.1 卫星遥感资料和地面观测资料

Landsat - 5 TM 包含 7 个波段的信息,其可见光波段(波段 1, 2 和 3)及近红外波段(波段 4, 5 和 7)的地面分辨率为 $(30 \times 30) \text{ m}^2$, 热红外波段(波段 6)的地面分辨率为 $(120 \times 120) \text{ m}^2$ 。Landsat - 7 TM 的可见光波段及近红外波段与 Landsat - 5 TM 相同,但其热红外波段(波段 6)的地面分辨率为

收稿日期:2003 - 08 - 04;改回日期:2003 - 09 - 17

基金项目:国家自然科学基金(40275003)、中国科学院“知识创新工程”课题(CACX3 - SW - 329)及国家基础重点研究发展规划项目(GI998040900)资助。

作者简介:马耀明(1964 -),男,山西夏县人,博士,研究员,主要从事大气边界层观测实验、陆面过程和卫星遥感研究。E-mail: ymma@ns.lzb.ac.cn.

(60 ×60) m²。这里选取 1991 年 7 月 9 日的 Landsat - 5 TM 资料代表 HEIFE 实验区的个例,而选取 2000 年 6 月 3 日、2000 年 8 月 22 日和 2001 年 1 月 29 日的 Landsat - 7 TM 资料分别代表 DHEX 实验区的夏初、夏末和冬季的个例(卫星过境时这两个实验区天气晴好,过境时为当地时间 10:00)。

结合卫星遥感分析,这里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。

1.2 HEIFE 实验和 DHEX 实验

HEIFE 实验区设在我国甘肃省河西走廊黑河流域上游一个 (70 ×90) km² 的区域内。在包括沙漠、戈壁和绿洲等不同的下垫面上,设置了 5 个包括大气(边界层塔站及辐射观测系统)、植被和土壤的多学科综合观测站、5 个自动气象站以及 4 个地下水观测站。同时收集观测实验期间实验区内 3 个常规气象站和 3 个常规水文站的数据。

DHEX 实验区设在我国甘肃省敦煌市。在距敦煌绿洲边缘约 7km 的戈壁设置了 1 个微气象综合观测站(包括边界层塔站及辐射观测系统),在敦煌绿洲上设置了 1 个测量大气和土壤各个分量以及大气湍流的 PAM(Portable Atmospheric Mesonet)站,在绿洲与戈壁的过渡带上设置了 1 个自动气象站。

1.3 参数化方案及结果

图 1 是 Ma 等^[2~5]提出的利用 Landsat TM 资

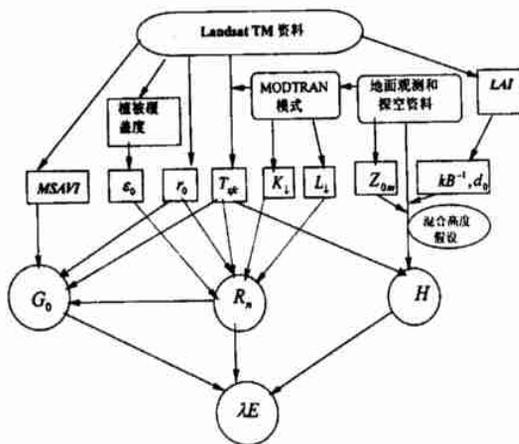


图 1 Landsat TM 资料结合地面观测确定地表热通量的参数化方案

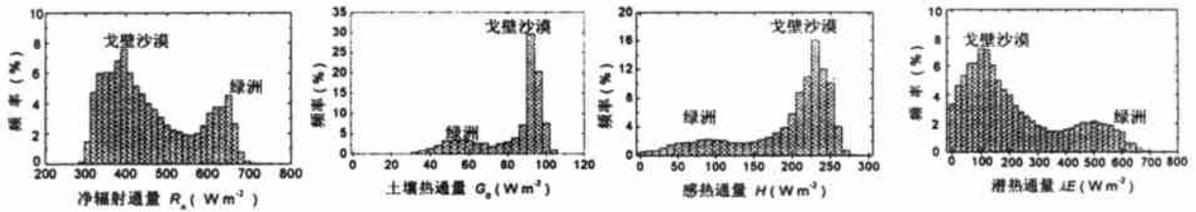
Fig. 1 Diagram of parameterization procedure by combining Landsat TM data with field observations

料结合地面观测推算区域地表能量通量的参数化方案。此方案分 2 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^[6],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^[7]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)^[2~5]。

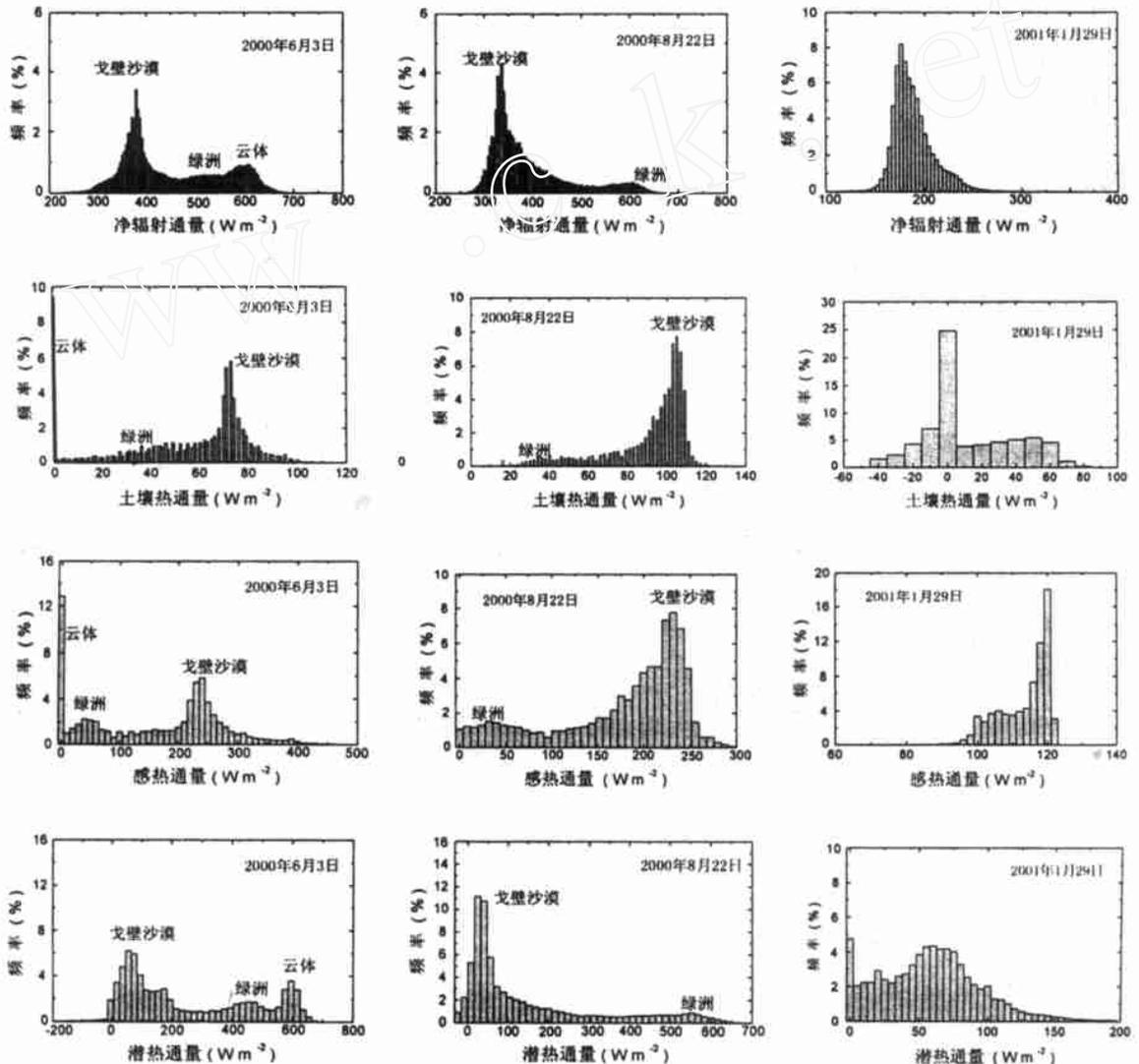
利用 Ma 等^[2~5]提出的参数化方案,得到了 HEIFE 实验区和 DHEX 实验区的地表能量通量分布。结果显示:(1)推算得到的 2 个实验区地表特征参数(地表温度和地表反射率)、各植被参数(NDVI、校准后的土壤调整植被指数 MSAVI、植被覆盖度 Pv 和叶面指数 LAI)和地表热通量各分量(净辐射通量 Rn、土壤热通量 G₀、感热通量 H 和潜热通量 E 与实验区的地表状况十分吻合。在 HEIFE 实验区和 DHEX 实验区由于地表状况差异很大,所以这些通量的分布范围都很宽,且有两个峰值点,一个对应于戈壁沙漠,另一个对应于绿洲(图 2)。(2)推算得到的 2 个实验区的地表温度和地表反射率与地面观测值较为接近,平均绝对百分比误差(MAPD)都 < 10%;(3)基于 MSAVI 的估算区域土壤热通量方法对干旱和半干旱地区非均匀下垫面是适用的,尽管推算得到的区域土壤热通量略高于实测值,但已明显好与原来基于 NDVI 的结果^[8~9];(4)推算得到的 HEIFE 实验区和 DHEX 实验区的感热通量与观测值十分接近(MAPD < 5%,图 3),这是由于我们对 Ta(x,y), Z_{0m}(x,y), d_{0m}(x,y) 和 kB⁻¹(x,y) 的改进的缘故^[2~5]。而原来在 HEIFE 实验区我们所用到的参数化方案所得到的结果^[8~9]仅仅可以用于戈壁和沙漠(MAPD = 9.37% 和 MAPD = 6.21%),但对于绿洲而言差异却很大(临泽:MAPD = 36.76% 和张掖:MAPD = 34.40%);(5)对 DHEX 实验区而言,无论是在戈壁沙漠上还是在绿洲上,夏季的地表温度明显大于冬季。而绿洲上 2000 年 6 月 3 日的地表温度大于 2000 年 8 月 22 日的地表温度,是由于 2000 年 6 月 3 日绿洲的地表尚未全部为植被覆盖,而 2000 年 8 月 22 日绿洲的地表已完全为植被覆盖之故^[5]。(6)对“敦煌实验”区而言,夏末和夏初(2000 年 8 月 22 日和 2000 年 6 月 3 日)绿洲上的净辐射通量及潜热通量明显地大于冬季(2001 年 1 月 29 日),但同时夏末和夏初的

绿洲上的感热通量却明显地小于冬季. 夏末和夏初戈壁沙漠上的净辐射通量、感热通量及土壤热通量都明显地大于冬季, 而夏末和夏初戈壁沙漠上的潜

热通量却很小 ($40\text{W}/\text{m}^2$ 左右), 这是由冬夏季节差异及冬夏两季地表状况差异所造成的^[5].



(a)



(b)

图2 地表热通量的频率分布

(a) HEIFE、(b) DHEX

Fig. 2 Frequency distribution of land surface heat fluxes

(a) HEIFE、(b) DHEX

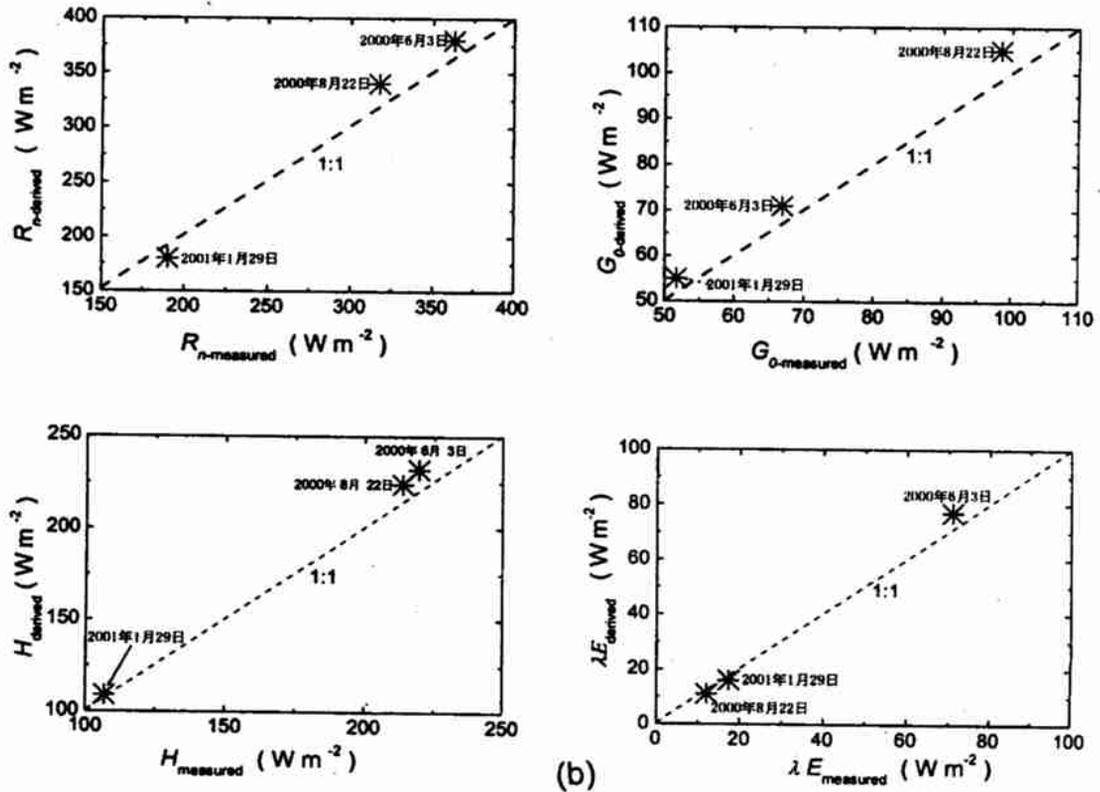
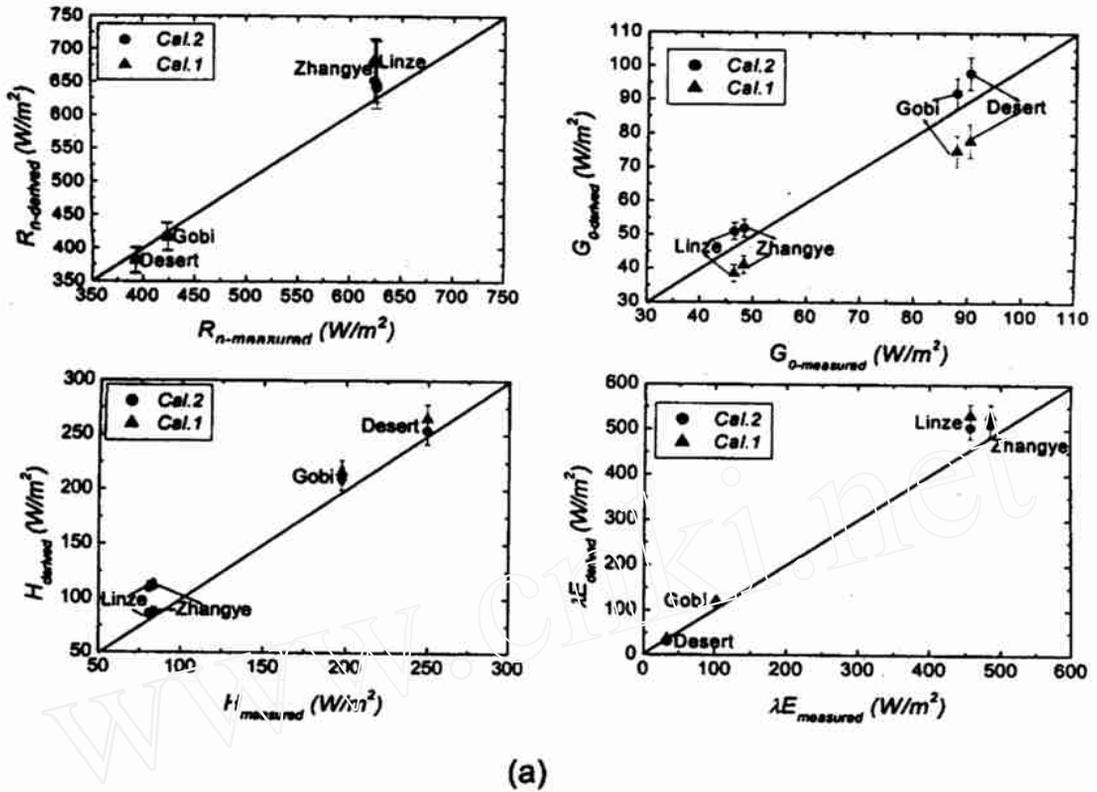


图 3 HEIFE 实验区和 DHEX 实验区推算得到的地表热通量与实测值比较

(a) HEIFE Cal. 1:原结果^[8-9]、Cal. 2:本文结果、(b) DHEX

Fig. 3 Validation of the derived results against the field measurements for land surface heat fluxes ,together with 1:1 line. Cal. 1:former results^[8-9]、Cal. 2:this research、(a) HEIFE、(b) DHEX.

2 利用 NOAA/ AVHRR 资料估算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 实验区取得的一些结果。

2.1 卫星遥感资料和地面观测资料

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 \times 1) km^2 。Ma 等选取 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 实验区的季风前、季风中和季风后的个例^[10~11]。

结合卫星遥感分析,这里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。

2.2 GAME/ Tibet 实验

GAME/ Tibet 实验区设在藏北那曲地区的一个(150 \times 200) km^2 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) 2 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、湍流通量直测系统、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、土壤温湿度和降水等测量; 3) 设在那曲北和南各约 80km 处的 PAM(Portable Automated Meso - net)站,含有类似于上述 2 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。

2.3 参数化方案及结果

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,国内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 地表反射率、植被指数及亮温等^[12~17]。田国良、郑柯用 NOAA1 AVHRR 资料和地面气象站资料估算作物蒸散和土壤含水量^[18]。陈乾和陈添宇提出了一种由 NOAA1 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。马耀明(Ma)等提出了一种 NOAA - 14/ AVHRR 资料结合地面观测推算区域地表能量通量的参数化方案^[10~11]。图 4 是此参数化方案的框图。此方案分 2 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^[6],求得区域上的地表参数(地表温度和地表反射率)和各植被参数(NDVI、植被覆盖度、调整土壤植被指数 MSAVI^[7]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)。

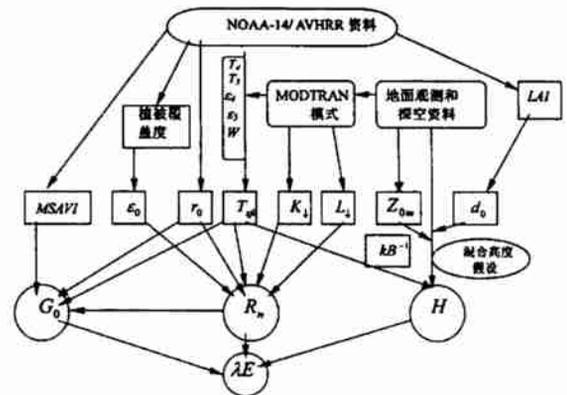


图 4 NOAA - 14/ AVHRR 资料结合地面观测确定地表热通量的参数化方案

Fig. 4 Diagram of parameterization procedure by combining NOAA - 14/ AVHRR data with field observations

利用 Ma 等提出的参数化方案^[10~11],得到了 GAME/ Tibet 实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实验区的地表状况相吻合。由于在实验区既

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(图 5)。(2)推算得到的实验区的地表反射率、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 < 10.0%(图 6)。(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 实验区 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)实验区的地表反射率、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)实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,而季风中季风后地面

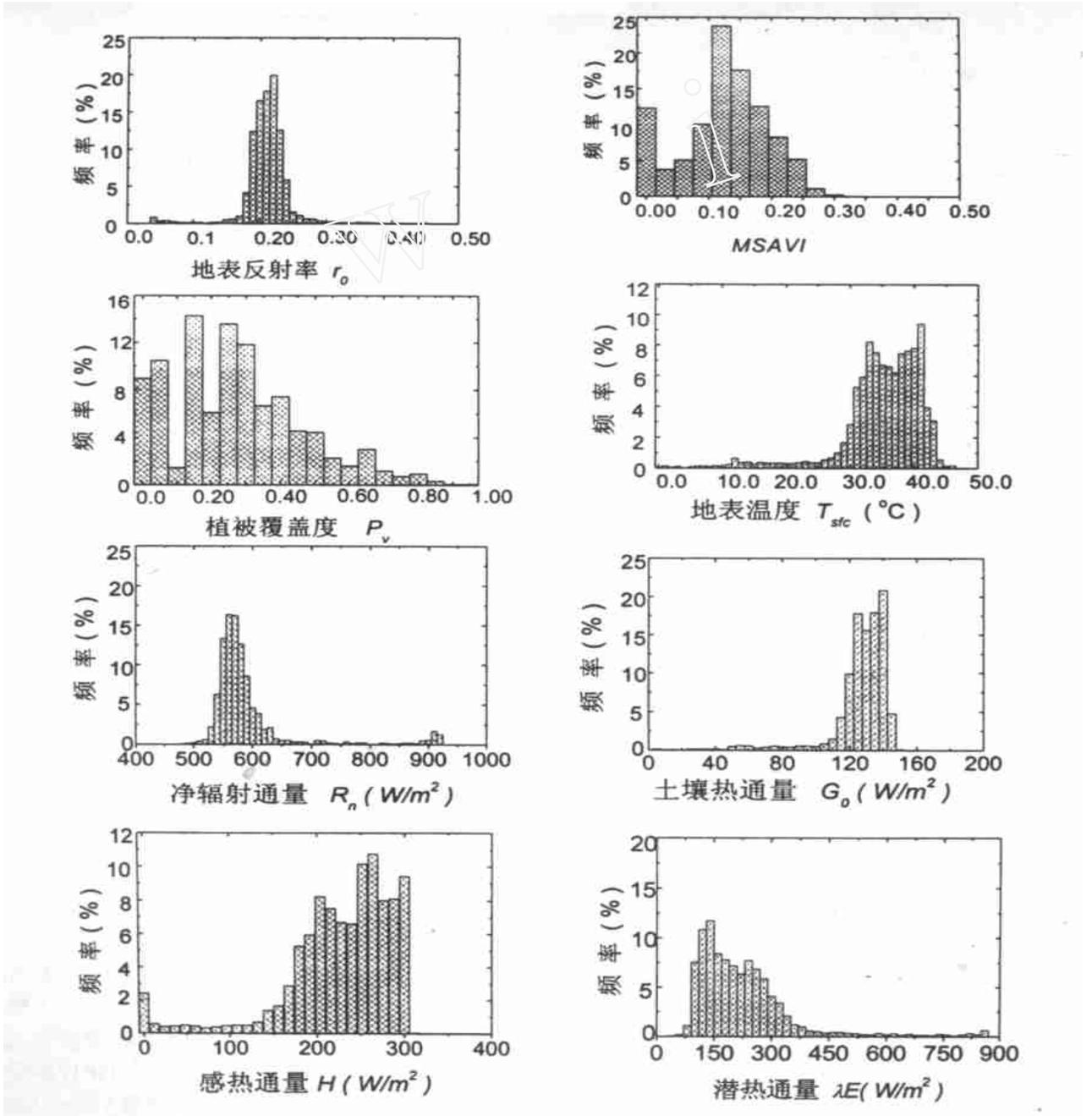


图 5 GAME/ Tibet 实验区地表热通量的频率分布

Fig. 5 Frequency distribution of land surface heat fluxes over the GAME/ Tibet area

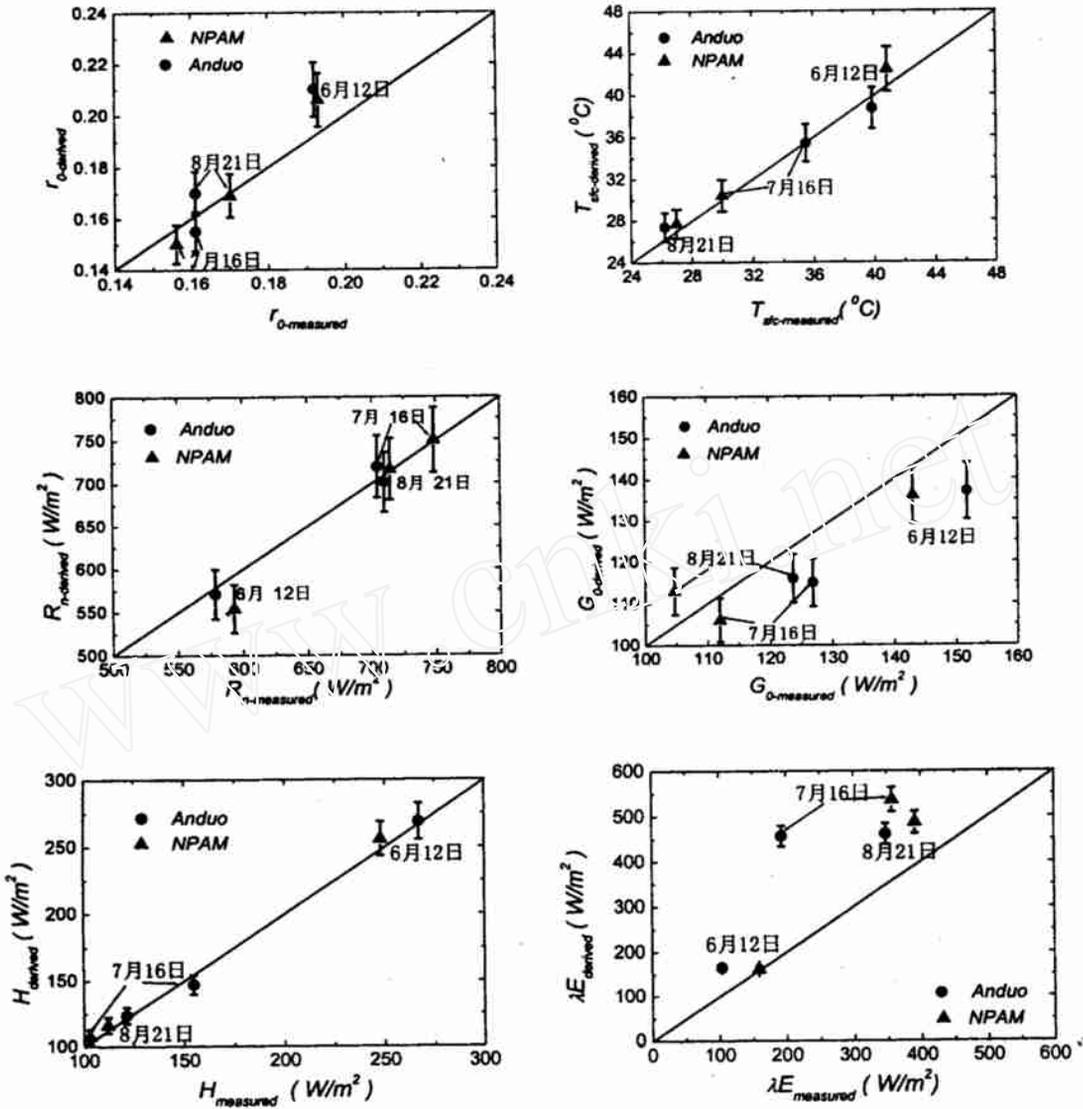


图6 GAME/ Tibet 实验区推算得到的地表热通量与实测值比较

Fig. 6 Validation of the derived results against the field measurements for land surface heat fluxes over the GAME/ Tibet area, together with 1:1 line.

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) < 10.0% (图6),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”^[20-26],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,其它站点和时次的推算值与观测值相差都很大(图6)。

3 结束语

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 E)。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2个新参数化方案以及它们在干旱区(HEIFE实验区和DHEX实验区)和青藏高原地区(GAME/ Tibet实验区)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

常有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,但在这方面又有很长的路要走。

致谢:本研究得到中国科学院知识创新项目(KZCX3-SW-329和KZCX2-301)、国家自然科学基金(40275003)和国家重点基础研究发展规划项目G1998040900的资助。作者非常感谢京都大学H. Ishikawa副教授、冈山大学O. Tsukamoto教授、Wageningen大学的苏中波博士、M. Menenti教授、P. Henk博士和R. Gerbert博士对本工作的全力支持。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

- [1] 王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究 - 从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME - Tibet/ TIPEX[J]. 高原气象, 1999, 18(3): 280 - 294.
- [2] Ma Yaoming, Tsukamoto O. Combining satellite remote sensing with field observations for land surface heat fluxes over inhomogeneous landscape[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002, 1 - 172.
- [3] Ma Y, 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.
- [4] Ma Y, 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.
- [5] Ma Yaoming, Wang Jiemin, Huang Ronghui, 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.
- [6] Berk A, Bernstein L S, Robertson D C. MODTRAN: A moderate resolution model for LOTRAN 7, GL - TR - 89 - 0122, 1989.
- [7] Qi J, Chehbouni A, Huete A R, et al. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 48: 119 - 126.
- [8] Wang J, Ma Y, 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.
- [9] 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.
- [10] Ma Y M, Su Z, Li Zh L, et al. Determination of regional net radiation and soil heat flux densities over heterogeneous landscape of Tibetan Plateau [J]. Hydrological Processes, 2002, 16(15): 2963 - 2971.
- [11] Ma Y M, Ishikawa H, Tsukamoto O, et al. Regionalization of surface fluxes over heterogeneous landscape of Tibetan Plateau using satellite remote sensing data[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2003, 81(2): 277 - 293.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Zhong qiang, Li Yinhai. Satellite observation of surface albedo over Qinghai - Xizang Plateau region [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1988, 5: 57 - 65.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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): 155 - 162.
- [18] 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.
- [19] Chen Qian, Chen Tianyu. Estimation of river basin evapotranspiration over complex terrain using NOAA AVHRR, elevation and meteorological data, HEIFE Report 6, 1991.
- [20] Ma Y, Tsukamoto O, Wang J, et al. The characteristics of micrometeorology in the northern Tibetan Plateau area. Proceedings of the 1st International Workshop on GAME - Tibet, Xi 'an, China, 1999, 99 - 102.
- [21] Ishikawa H, Tsukamoto O, Hayashi T, et al. Summary of the boundary layer observation and the preliminary analysis. Third International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle, Beijing, China, 1999, 45 - 46.
- [22] Ma Y, Tsukamoto O, Wang J, et al. Transfer and micrometeorological characteristics in the surface layer of the atmosphere above Tibetan Plateau area. Third International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle, Beijing, China, 1999, 55 - 56.
- [23] Wang J, Kim J, Liou Y, et al. Energy balance analysis and one - dimensional simulation of land surface process in a short - grass site of Central Tibetan Plateau. Third International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle, Beijing, China, 1999, 424 - 425.
- [24] 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.
- [25] Tanaka K, Ishikawa H, Hayashi T, et al. Surface Energy Budget at Amdo on Tibetan Plateau using GAME/ Tibet IOP '98 Data [J]. Journal of Meteorological Society of Japan, 2001, 79(1B): 505 - 517.
- [26] Ma Y M, Su Z, 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.

The Study of Regional Land Surface Heat Fluxes over Heterogeneous Landscape in Northwest Arid Areas and Tibetan Plateau by Using Satellite Remote Sensing

MA Yao - ming ,MA Wei - qiang ,LI Mao - shan ,WANG Jie - min

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute ,
The Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China)

Abstract :The progress and difficulties on the study of regional land surface heat fluxes over heterogeneous landscape by using Landsat TM and NOAA/ AVHRR data were introduced in this study. The solving way of the difficulties was also proposed.

Key words :heterogeneous landscape ; regional land surface heat fluxes ; satellite remote sensing ; Landsat TM ; NOAA/ AVHRR

www.cnki.net