

卫星遥感结合地面观测 估算中国西北区东部地表能量通量

陈添宇, 陈 乾, 李宝梓

(甘肃省人工影响天气办公室, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 采用定西麦田微气象观测站和试验区其它地区 36 个自动气象站、91 个常规气象站资料, 结合 NOAA-16 卫星的 AVHRR 资料, 用地表能量平衡算法(SEBAL)推导中国西北区东部 4~8 月的日平均地表净辐射、感热、潜热、土壤热通量密度和波文比的区域分布特征, 并按土地覆盖类型的不同分别统计沿黄灌区、冬春小麦雨养农田、草地、森林和沼泽草甸等不同地表的能量通量特征。结果显示: 作物不同生育期, 自南向北由湿润的常绿林区经半干旱雨养农业区直到干旱的荒漠地带, 地表能量输送存在巨大的地区差异。计算结果与实测值之间的平均绝对百分误差为 4%~21%, 两者基本相符, 该方法在算法上解决了用卫星资料反演地气温差的难点问题, 提高了感热通量区域分布的计算精度。

关键词: 中国西北区东部; 卫星遥感; 地表能量通量密度

中图分类号: S163+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006)03-0007-09

由于人们对全球环境和气候变化的日益关心, 作为气候形成和变化的陆面过程的观测试验已被世界气候研究计划(WCRP)和国际陆圈生物圈计划(IGBP)列为重要研究领域。自 20 世纪 80 年代以来国外开展了许多野外观测研究, 我国也相继开展了黑河实验(HEIFE)^[1~2], 全球能量水分循环亚洲季风试验^[3](GAME)和敦煌试验^[4]等研究, 取得了大量资料和科研成果。已从单点观测发展到利用卫星遥感估算非均匀陆面上地气间能量通量的区域分布特征^[3,5]。但在荒漠化威胁日益严重的黄土高原半干旱地区尚停留在点和局地尺度上^[6~7], 对其区域分布的研究还不够。本文的目的是结合气象资料, 用卫星遥感技术推算出西北区东部地表特征参数, 进而估算复杂地形下作物生长季(4~8 月)地表能量平衡各分量和波文比的区域分布。由于此试验区处于青藏高原、黄土高原和秦岭山地交汇处, 下垫面性质极其复杂, 故按土地覆盖类型, 估算不同农作物和沙漠、森林、草地等不同季节地表能量平衡各分量的差异, 以期对本试验区陆面过程的参数化以及地气相互作用的深入研究有所帮助。

1 试验区域和资料

研究区定在 33°N~38°N, 102°E~108°E; 卫星资料用 2001 年 6 月~2003 年 8 月的 NOAA-16

(北京时 13~15 时)AVHRR 通道 1 和 2 的反射率及通道 4 和 5 的亮温资料; 地面资料用定西 2003 年 6~8 月的微气象观测资料, 包括超声三维风速、温度脉动仪和水汽通量仪的 20 min 平均感热、潜热、动量通量和摩擦速度, 16 m 高铁塔 4 层 1 min 平均风速和温度梯度, 地中热流板观测的每小时土壤热通量, 每分钟的平均短波入射、反射辐射通量和长波入射、地面放射辐射通量等。试验场地和仪器架设情况详见杨兴国等近期的工作^[7]。辐射资料用 1959~2000 年兰州、民勤、西宁、银川、固原、延安、西安、安康 8 站的资料。试验区的地面测站分布如图 1。

2 计算方法

2.1 太阳总辐射

$$Q = Q_0(a + b \times S) \quad (1)$$

式中: Q 为太阳总辐射; S 为日照百分数; Q_0 为晴空时太阳总辐射, 用钟强^[8]的方法计算。 a 、 b 为用兰州等 8 站资料拟合的回归系数(见表 1)。

2.2 地面反射率

参照陈添宇^[9]和吴艾生^[10]的方法, 用兰州、定西实测地面反射率资料, 得到地面反射率的计算式:

$$r_s = A + B \times r_1 + C \times r_2 \quad (2)$$

式中: r_1 和 r_2 分别为 AVHRR 通道 1 和 2 的反射率; A 、 B 、 C 为回归系数(见表 2)。

收稿日期: 2005-10-08

资助项目: 甘肃省自然科学基金“用卫星资料反演蒸散”(ZR-94-073)

作者简介: 陈添宇(1964—), 男, 福建建瓯人, 副研究员, 主要从事遥感和人工影响天气研究工作。E-mail: chenty@gmsa.gov.cn.

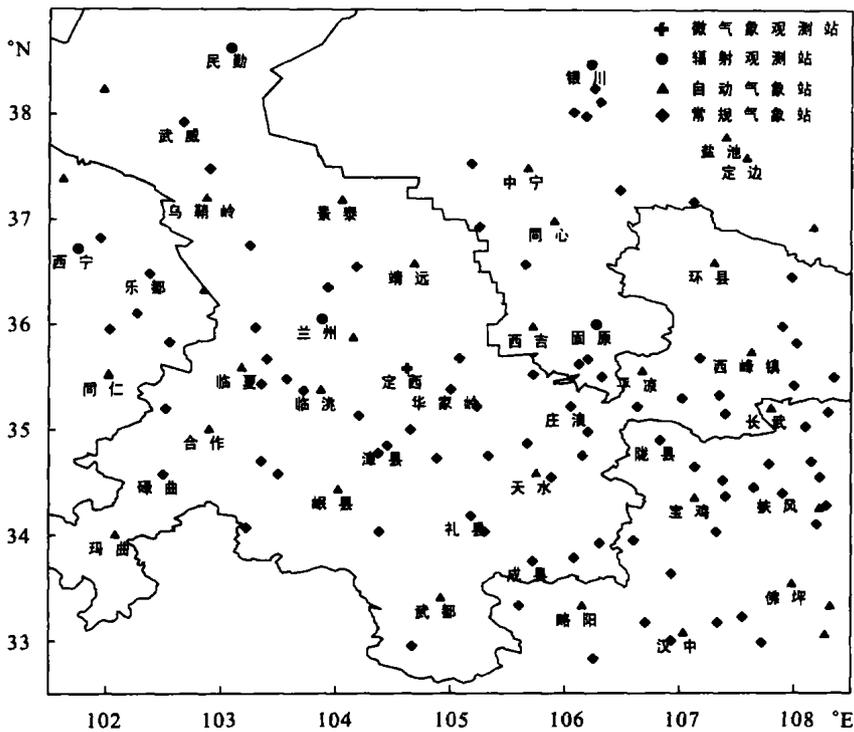


图 1 试验区地面观测台站分布

Fig. 1 The sites layout of weather stations for field observations experimental region

表 1 晴天辐射值与总辐射值之间的经验系数和相关系数 (1959~2000)

Table 1 The regression coefficients and correlation coefficients between global radiation in clear sky and global radiation

月份 Month	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	样本数 Sample
4	0.3830	0.6176	0.7660	232
5	0.3602	0.6931	0.7548	233
6	0.3109	0.7246	0.8099	233
7	0.3312	0.6707	0.7443	232
8	0.3349	0.6733	0.7509	227
4~8	0.3480	0.6585	0.7647	1157

表 2 由 AVHRR 通道 1 和 2 反射率反演的地面反射率系数

地表特征 Land surface	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
雪、冰川	-0.0902	0.500	0.925
裸土、裸岩	-0.0602	0.527	0.793
植 被	-0.0710	0.487	0.987
沙漠、荒漠	0.0020	0.854	0.349
水 面	-0.0266	1.148	-0.529

2.3 地面有效辐射

按王可丽^[11]的方法,地面有效辐射的计算式为:

$$F_{\text{日}} = a + b \times \overline{OLR} \quad (3)$$

$$\overline{OLR} = 5.67 \times 10^{-8} \times T_F^4 \quad (4)$$

$$T_F = a' + b' \times T_B + c' \times T_B^2 \quad (5)$$

式中: $F_{\text{日}}$ 为地面有效辐射的日平均值 (w/m^2); \overline{OLR} 为射出长波辐射通量 9 格点平均; a, b 是用兰州和定西的资料统计反演的系数(见表 3); T_F 是由窄波段辐射率计算的大气顶热红外波段射出辐射率的等效亮温, T_B 为通道 5 的亮温值。 a', b', c' 为经验回归系数, 我们采用国家卫星中心提供的 NOAA-16 的系数。

表 3 \overline{OLR} 与兰州定西日有效辐射值之间拟合的回归系数 (资料年代 2001 和 2003 年)

Table 3 The regression coefficients between \overline{OLR} and effective radiation in Lanzhou and Dingxi

月份 Month	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	样本数 Sample
4~5	65.667	0.1357	0.896828	9
6	62.946	0.1314	0.800000	8
7	49.183	0.1321	0.818169	30
8	41.235	0.2191	0.894427	28
4~8	26.285	0.1829	0.849706	75

2.4 地表净辐射

地表净辐射 R_n 按下式计算:

$$R_n = Q \times (1 - r_s) - F_{\text{日}} \quad (6)$$

2.5 土壤热通量

参照 B·J·Chodhury 等的工作^[12],用定西干旱试验基地观测的土壤热通量 G 、净辐射 R_n 、卫星反演的地面反射率 \bar{r}_s 、表面温度 T_s 和标准化植被指数 $NDVI$,拟合出下式:

$$G/R_n = \frac{T_s - 273}{\bar{r}_s} \times (0.00073 - 0.00806 \times \bar{r}_s + 0.04132 \times \bar{r}_s^2) \times [1 - 0.97892 \times (NDVI)^4] \quad (7)$$

2.6 表面温度

采用 Sobrino 和 Raissouni^[13]的方案,拟合得到反演表面温度的经验算式:

$$T_s = T_4 + 1.5 \times (T_4 - T_5) + 0.43 \times (T_4 - T_5)^2 + 4.83 + (52 - 5 \times W) \times (0.029 - 0.018 \times P_v) \quad (8)$$

式中 T_4 、 T_5 分别为通道 4 和 5 的亮温; P_v 为植被盖度; W 为整层水汽含量,按陈乾^[14]的经验公式计算。

2.7 感热和潜热通量

感热通量计算的公式为:

$$H = 350 \times \frac{P_s}{T_a} (T_s - T_a) / \Gamma_a \quad (9)$$

式中: T_s 为表面温度; T_a 为气温; P_s 为地面气压 (hPa); Γ_a 为空气动力学热输送阻抗,用下式计算^[3,5]:

$$\Gamma_a = \frac{1}{k \times u_*} \left[\ln \left(\frac{Z - d_0}{Z_{0m}} \right) + kB^{-1} - \Psi_h \right] \quad (10)$$

式中: Z 是参考高度; k 是冯·卡门常数; d_0 为零平面位移高度; Ψ_h 是稳定度热力修正函数; Z_{0m} 为动量粗糙长度; kB^{-1} 是热量输送附加阻抗。李宝梓等取定西单部超声三维风速温度脉动仪的资料,用独立方法计算出 Z_{0m} 和 kB^{-1} ,然后用卫星反演的 $NDVI$ 和 T_s 将其推广到面上; u_* 为摩擦速度用下式导出:

$$u_* = k \times u \left[\ln \left(\frac{Z - d_0}{Z_{0m}} \right) - \Psi_m \right]^{-1} \quad (11)$$

式中: u 为气象站 10 m 高度上的风速; Ψ_m 是稳定度动量修正函数。将(10)和(11)式代入(9)式则得下式:

$$H = \frac{350 \times P_s \times k^2 \times u_B \times (T_s - T_a)}{T_a \left[\ln \left(\frac{Z_B - d_0}{Z_{0m}} \right) + kB^{-1} - \Psi_h \right] \times \left[\ln \left(\frac{Z_B - d_0}{Z_{0m}} \right) - \Psi_m \right]} \quad (12)$$

式中: u_B 、 Z_B (取 100 m) 分别是掺混层顶的风速和高度,按王介民的方法^[15]100 m 高处的风速可用下

式计算:

$$u_B = u_* \frac{\ln(Z_{100}/Z_{0m})}{k} \quad (13)$$

根据 Webb^[16] 和 Businger^[17] 的计算得到稳定度修正项,代入(12)式可得到不稳定和稳定条件下的感热通量表达式。不稳定时 ($T_s - T_a \geq 0$) 的表达式为:

$$H = \frac{350 \times P_s \times k^2 \times u_B \times (T_s - T_a)}{T_a \left[\ln \left(\frac{Z_B - d_0}{Z_{0m}} \right) + kB^{-1} + 5 \times R_i \right] \times \left[\ln \left(\frac{Z_B - d_0}{Z_{0m}} \right) + 5 \times R_i \right]} \quad (14)$$

稳定时 ($T_s - T_a < 0$) 的表达式是:

$$H = \frac{350 \times P_s \times k^2 \times u_B \times (T_s - T_a)}{T_a \left[\ln \left(\frac{Z_B - d_0}{Z_{0m}} \right) + kB^{-1} + \frac{5 R_i}{1 - 5.2 \times R_i} \right] \times \left[\ln \left(\frac{Z_B - d_0}{Z_{0m}} \right) + \frac{5 \times R_i}{1 - 5.2 \times R_i} \right]} \quad (15)$$

(14)和(15)式中: R_i 为 Richardson 数; T_s 是地表温度; T_a 是气温。我们用卫星资料反演 $T_s - T_a$ 的经验公式如下:

$$T_s - T_a = 0.73448 \times T_s - 8.75158 \times NDVI + 0.0047 \times Z - 223.8376 \quad (16)$$

上式复相关系数高达 0.9346, T_s 、 T_a 用 K 氏温标, Z 取 m。用定西试验基地实测资料和卫星资料,统计得计算日平均感热通量的经验公式。

$$H_{\text{日}} = 0.209 \times H + 15.724 \quad (17)$$

上式相关系数达 0.8。 $H_{\text{日}}$ 为感热通量日平均值。将 R_n 、 G 和 $H_{\text{日}}$ 代入下式用余项法可得潜热通量日平均值 λE 。

$$\lambda E = R_n - G - H_{\text{日}} \quad (18)$$

3 能量平衡各分量的区域分布特征

以 2001 年 6 月 13 日各能量通量图为例,按 8 种土地类型(如图 2)4~8 月平均能量通量及其占净辐射的比进行分析,重点分析其在黄土高原的分布。

3.1 地表净辐射

本试验区净辐射通量分布如图 3a,青藏高原东北缘 3 500 m 以上山脉净辐射较大,超过 220 W/m²,最大值在甘南沼泽达 248.3 W/m²,有林草覆盖的山区河谷中植被指数较小,其有效辐射和反射辐射均大于山脊,故陇南山地河谷盆地中的净辐射明显小于山区,而半干旱的黄土沟壑区则相反;沙漠净辐射最小值为 105.2 W/m²,4~8 月不同类型土地的平均净辐射沙漠戈壁最小仅 120 W/m²,甘南草甸最大接近 170 W/m²;三类农田中沿黄灌区最大达 135 W/m² 如表 4。

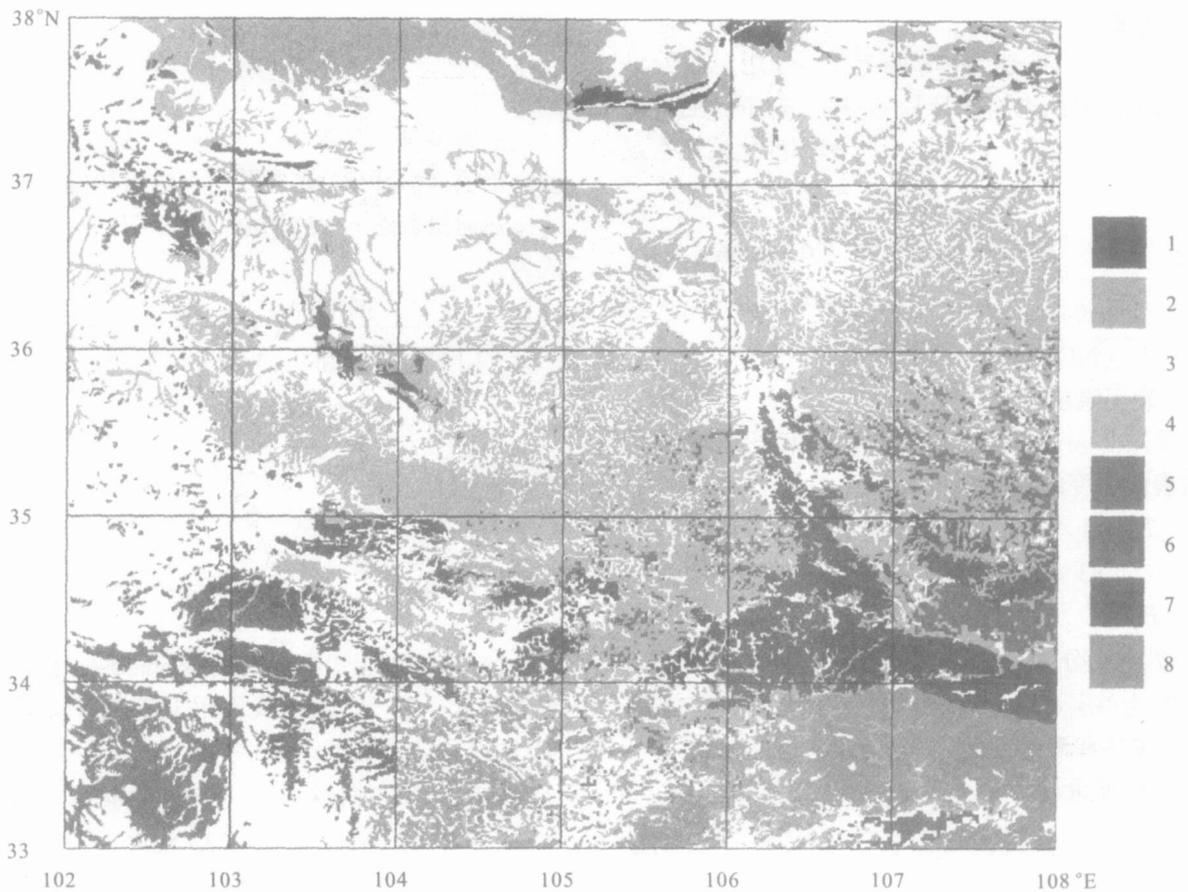


图 2 西北区东部土地利用类型

Fig. 2 The classification of landuse in east part of northwest China

注: 1. 沿黄灌区 The Yellow River irrigated paddy field, 2. 沙漠戈壁 Desert Gobi, 3. 半干旱草原 Semi-arid sparse grass land, 4. 春麦和其它农田 Spring wheat field and other crop field, 5. 冬麦区 Winter wheat field, 6. 甘南沼泽草甸 Gannan marsh land, 7. 针阔混合林 Pine and broadleaf forest, 8. 岭南常绿林 Evergreen forest, 白色为未计算区。

表 4 各土地类型区 4~8 月平均能通量及其占净辐射的百分比

Table 4 The average energy flux (W/m^2) from April to August and their percentage vs. net radiation for each land-use

各类型区 Region type	$R_n(W/m^2)$	$H(W/m^2)$	$H/R_n(\%)$	$\lambda E(W/m^2)$	$\lambda E/R_n(\%)$	$G(W/m^2)$	$G/R_n(\%)$
沿黄灌区	135.19	28.44	21.0	85.75	63.4	21.00	15.5
沙漠戈壁	120.01	71.47	59.5	20.52	17.1	27.95	23.3
半干旱草原	129.46	60.33	46.6	43.38	33.5	25.81	19.9
春麦区	131.72	34.52	26.2	73.32	55.7	23.88	18.1
冬麦区	126.61	28.68	22.7	79.88	63.1	18.16	14.3
沼泽草甸	169.62	36.93	21.8	114.07	67.2	18.63	11.0
针阔混交林区	151.84	30.63	20.2	104.13	68.6	17.08	11.2
岭南常绿林区	146.68	26.49	18.1	106.69	72.7	13.51	9.2

3.2 土壤热通量

图 3b 表明荒漠最大达 43, 岭南常绿林最小仅 10.7。4~8 月的平均值也如此, 沙漠戈壁最大接近 28, 占净辐射的 23.3%, 比 HEIFE 的 30%~40% 略小^[2]。岭南常绿林最小平均值为 13.5, 占净辐射的 9.2%。三类农田中冬麦区最小, 春麦区最大为 23.9 占净辐射的 18%, 与柯晓新等^[6]在定西旱作春麦农

田中的观测值接近。

3.3 感热通量

高原感热通量较小, 有林草覆盖的山区感热通量河谷大, 山脊小。唯有黄土高原相反, 河谷中为灌溉农田故感热小于植被稀少的梁峁, 如图 3c 所示。腾格里沙漠感热最大达 100.9, 岭南常绿林区最小仅 6.9。4~8 月各类土地的平均也是沙漠区最大为

71.5, 约占净辐射的 60%, 其次是半干旱草原, 岭南常绿林区最小 26.5, 占净辐射的 18%, 三类农田中沿黄灌区最小 28.4, 春麦区最大为 34.5, 占净辐射的 26%, 与定西 4~7 月平均值^[6]相符, 比夏季测值^[7]小。

3.4 潜热通量

高原东北缘潜热较大(>150)。半干旱黄土高原河谷潜热大于梁峁, 有林草覆盖的山区则相反。

北部沙漠地区潜热最小为 0.7, 甘南沼泽最大达 189.7, 如图 4d。表 4 给出 4~8 月平均潜热, 沙漠最小仅 20.5 占净辐射 17%, 比 HEIFE 的大^[2]; 沼泽最大, 其次是岭南常绿林区, 占净辐射 73%, 为各类土地利用之冠。因此林区降水多乃普遍现象, 尤其半干旱黄土高原中孤立的石山林区, 如兴隆山更显著。春麦区的潜热为三类农田中最小, 占净辐射 56%, 与定西观测值^[6~7]接近。

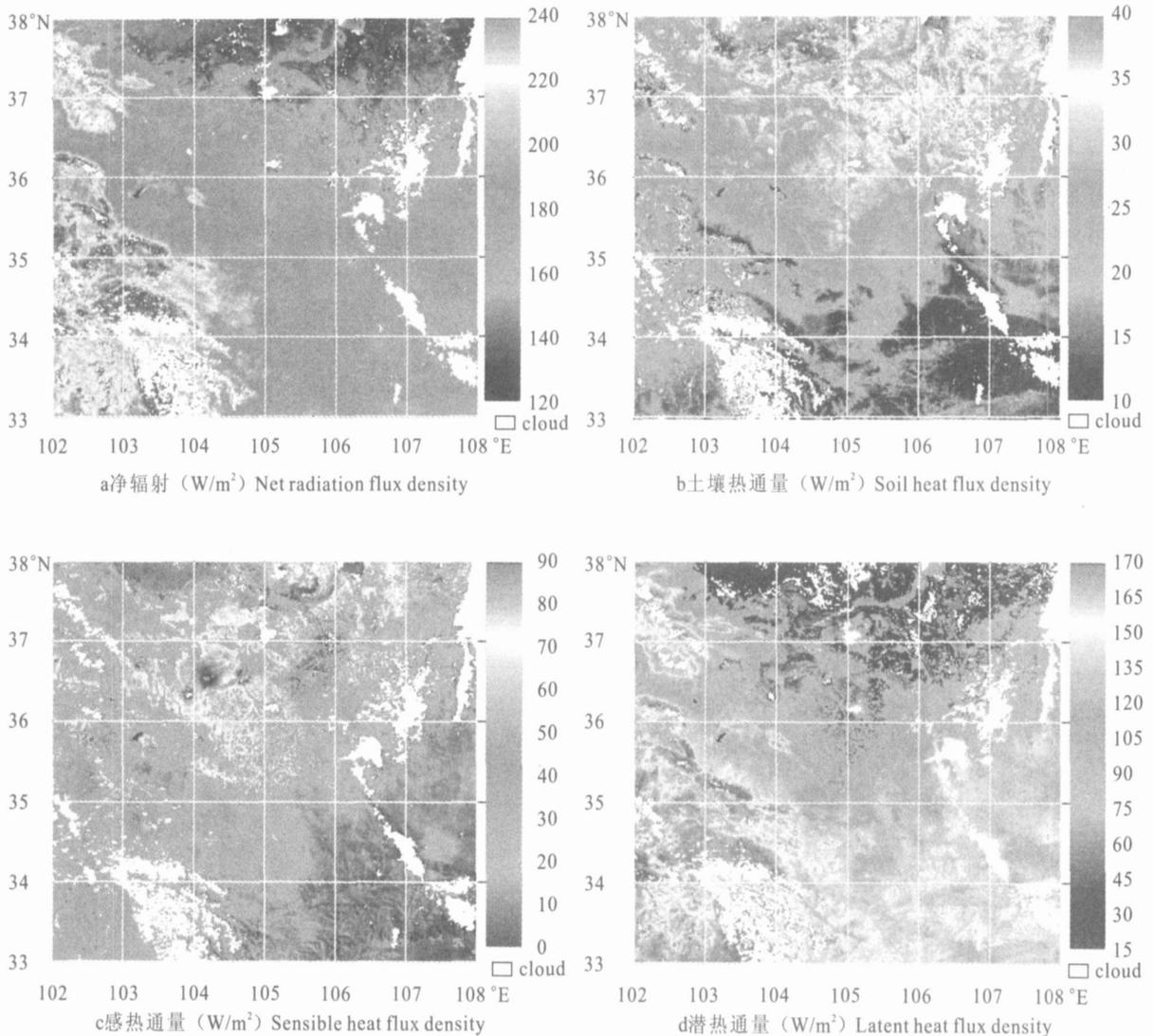


图 3 2001 年 6 月 13 日西北区东部地表能量通量密度

Fig. 3 Maps of land surface energy flux densities for the east part of northwest China in June 13 2001

4 能量平衡各分量的季节变化

整个试验区能量平衡各分量的最小值均在 4 月, 但其峰值出现有先后。土壤热通量峰值出现最早在 5 月, 仅林区推迟到 6 月, 净辐射和潜热均在 6 月。必须指出 6 月系 2001 年的资料, 该年 6 月中旬

降水明显偏多气温偏高。各类土地的能量平衡各分量峰值出现时间基本相同, 仅北部沿黄灌区和沙漠戈壁净辐射和潜热峰值出现在 7 月(如表 5~8)。各能通量频率分布曲线如图 4, 频谱 4 月窄, 数值最小。

表 5 各土地类型区 4~8 月净辐射平均值和标准差(W/m^2)

Table 5 The average values and standard deviations of net radiation over each land-use from April to August

类型区 Region type	2003-04-16		2003-05-01		2003-06-13		2003-07-24		2003-08-19	
	平均值	标准差								
沿黄灌区	91.66	8.56	136.66	9.80	145.00	9.86	158.27	6.99	144.34	6.41
沙漠戈壁	77.15	9.55	121.68	7.04	135.29	8.65	139.74	10.52	126.20	7.50
半干旱草原	90.04	11.21	127.46	9.47	152.63	16.48	146.36	12.91	130.82	13.73
春麦区	91.91	12.20	129.55	10.13	159.38	15.49	147.27	16.99	130.47	18.18
冬麦区	86.67	13.74	134.57	10.61	166.25	9.23	134.53	17.60	111.04	15.78
沼泽草甸	125.19	15.38	159.36	16.03	212.81	11.30	185.96	12.63	164.80	11.14
针阔混合林区	109.10	16.23	162.40	18.67	184.19	24.54	161.20	28.39	142.33	25.67
岭南常绿林区	102.83	23.79	157.77	18.56	174.06	14.49	161.17	36.47	137.54	27.15

表 6 各土地类型区 4~8 月土壤热通量平均值和标准差(W/m^2)

Table 6 The average values and standard deviations of soil heat flux over each land-use from April to August

类型区 Region type	2003-04-16		2003-05-01		2003-06-13		2003-07-24		2003-08-19	
	平均值	标准差								
沿黄灌区	12.21	3.30	26.24	5.67	21.42	4.61	22.10	3.49	23.02	3.18
沙漠戈壁	12.40	3.25	34.92	5.63	33.89	4.16	28.51	4.13	30.01	2.72
半干旱草原	13.36	2.83	32.35	5.68	29.54	4.04	26.51	3.60	27.29	4.29
春麦区	13.09	2.85	31.11	5.46	27.04	4.61	23.88	3.94	24.28	4.56
冬麦区	10.88	3.49	24.23	4.30	20.02	2.38	19.07	3.88	16.60	3.39
沼泽草甸	15.36	4.76	22.21	6.00	22.17	6.01	17.95	3.50	15.46	2.73
针阔混合林区	10.50	3.28	19.34	5.48	20.75	7.15	17.97	5.31	16.83	5.66
岭南常绿林区	9.51	5.14	13.42	3.32	16.02	3.99	15.80	6.93	12.81	3.07

表 7 各土地类型区 4~8 月感热平均值和标准差(W/m^2)

Table 7 The average values and standard deviations of sensible heat flux over each land-use from April to August

类型区 Region type	2003-04-16		2003-05-01		2003-06-13		2003-07-24		2003-08-19	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
沿黄灌区	19.14	4.20	26.08	6.00	27.97	6.15	31.58	3.84	37.42	6.54
沙漠戈壁	45.66	5.66	72.62	3.94	80.71	5.34	83.07	5.98	75.28	4.42
半干旱草原	36.15	8.45	54.41	7.25	70.14	9.87	73.78	8.70	67.19	9.61
春麦区	24.94	5.90	36.26	4.67	34.20	6.47	38.48	5.93	38.71	6.78
冬麦区	22.26	7.94	31.62	8.47	28.13	7.00	33.12	10.27	28.29	8.97
沼泽草甸	32.82	8.16	29.43	6.07	37.50	3.80	44.20	6.06	40.69	4.46
针阔混合林区	24.69	6.44	30.32	5.78	29.55	6.02	35.57	9.21	33.03	8.87
岭南常绿林区	20.54	6.97	21.84	6.76	24.03	4.56	34.22	9.67	31.84	7.51

5 波文比的时空分布特征

波文比(Bowen ratio)是感热与潜热之比($H/\lambda E$),可表示气候的干湿程度。波文比的分布图表明,总的趋势是由东南湿润的常绿林区的最小值 0.076 向西北干旱的腾格里沙漠增大到极值 7.3。值得指出的是半干旱黄土高原梁峁上的波文比高达 0.5~2.5 远大于河谷中的 0.2~0.4,类似沙漠和绿洲。但其间有高度落差,从而加强谷风将河谷中的

水汽向山梁辐合,使梁峁降雹多于河谷。有植被覆盖的山区则相反,山脊波文比小于河谷,因而山脉阳坡感热和潜热高值重合区成为甘肃降雹最多的地区,如乌稍岭和太子山南坡^[18]。由表 9 可看出,4~8 月平均波文比沙漠戈壁最大为 4,常绿林区最小仅 0.27。三类农田中沿黄灌区最小,但大于张掖绿洲^[2],春麦区最大为 0.53 与定西麦田观测值接近^[6]。

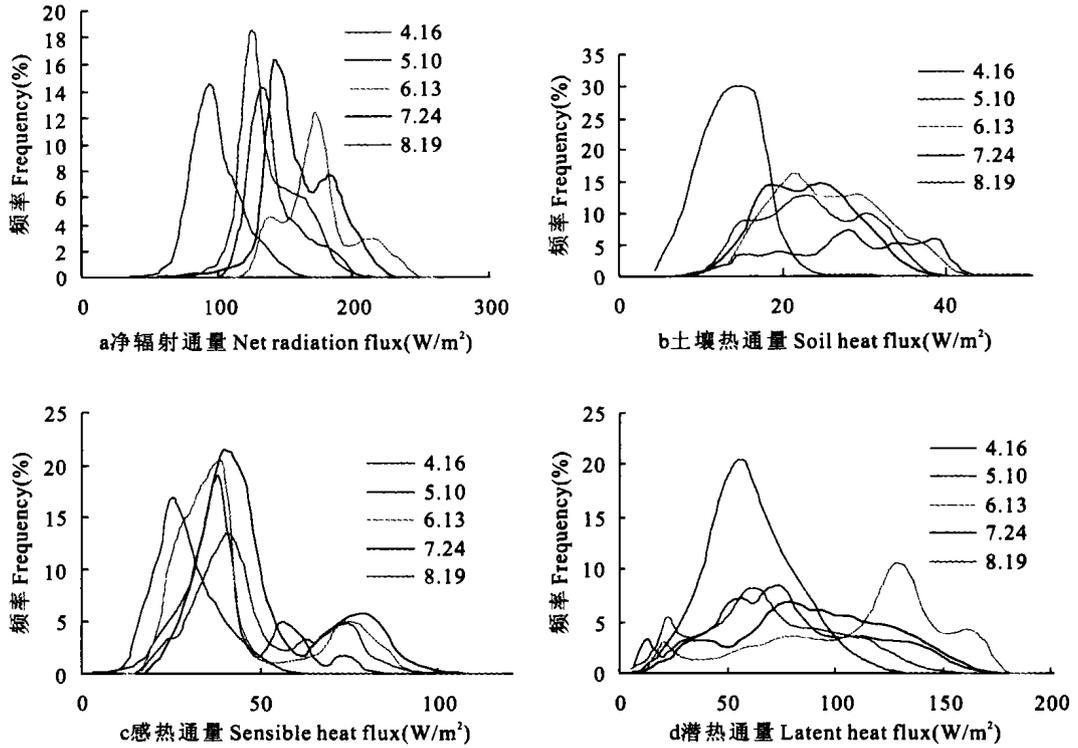


图4 试验区各项能通量4~8月的频率分布

Fig.4 Frequency distribution curve of energy flux densities over the experimental region from april to august

表8 各土地类型区4~8月潜热平均值和标准差(W/m²)

Table 8 The average values and standard deviations of latent heat flux over each land-use from April to August

类型区 Region type	2003-04-16		2003-05-01		2003-06-13		2003-07-24		2003-08-19	
	平均值	标准差								
沿黄灌区	60.31	12.64	84.34	17.97	95.61	16.03	104.60	12.73	83.90	12.48
沙漠戈壁	19.10	4.87	13.76	8.31	20.69	7.29	28.16	8.67	20.91	5.86
半干旱草原	40.53	13.92	40.67	18.76	52.96	22.24	46.13	18.57	36.60	19.91
春麦区	53.89	12.59	62.18	16.83	98.15	20.68	84.92	19.59	67.48	21.96
冬麦区	54.08	15.23	78.71	14.85	118.09	11.16	82.34	16.97	66.16	14.56
沼泽草甸	77.00	19.76	107.71	21.74	153.15	10.21	123.81	15.65	108.65	14.02
针阔混合林区	73.91	16.76	112.74	25.50	133.88	21.23	107.67	25.99	92.47	23.58
岭南常绿林区	72.88	19.56	122.52	17.80	134.01	11.01	111.15	27.48	92.89	21.88

表9 各土地类型区4~8月 Bowen 比平均值和标准差

Table 9 The average values and standard deviations of Bowen ratio over each land-use from April to August

类型区 Region type	2003-04-16		2003-05-01		2003-06-13		2003-07-24		2003-08-19		4~8月 平均
	平均值	标准差									
沿黄灌区	0.35	0.16	0.33	0.13	0.31	0.13	0.31	0.08	0.47	0.16	0.35
沙漠戈壁	2.51	0.58	6.25	2.47	4.24	1.10	3.21	0.94	3.83	0.89	4.01
半干旱草原	1.09	0.76	1.82	1.46	1.78	1.43	2.03	1.42	2.55	2.03	1.85
春麦区	0.50	0.19	0.64	0.25	0.37	0.16	0.48	0.15	0.65	0.29	0.53
冬麦区	0.48	0.33	0.43	0.20	0.24	0.09	0.44	0.30	0.47	0.33	0.41
沼泽草甸	0.48	0.23	0.29	0.11	0.25	0.04	0.37	0.09	0.38	0.09	0.34
针阔混合林区	0.36	0.17	0.30	0.15	0.23	0.09	0.35	0.14	0.39	0.18	0.33
岭南常绿林区	0.31	0.19	0.18	0.07	0.18	0.04	0.32	0.15	0.36	0.13	0.27

6 精度检验

本试验区仅定西 2003 年 6 月 18 日~8 月 13 日有能量平衡各分量的观测数据,其中与卫星资料匹配的仅 9 次。我们将估算值与实测值比较,计算绝对百分误差,作为本模式的精度检验标准。结果如表 10。总辐射误差最小,将兰州、定西逐日实测的总辐射与按(1)式计算的总辐射作比较,平均绝对误差分别为 1.36 和 1.35 W/m^2 ,相对误差 5% 和

4%。误差最大的是有效辐射,但比采用表面温度和气温直接计算的误差小,因反演温度及地面和空气比辐射率空间分布的误差将严重影响长波辐射的差额。净辐射、感热和潜热通量的相对误差在 13%~16%,基本满意。总之本试验由于微气象观测仅定西单点,沙漠、森林、沼泽等不同土地类型区没有边界层观测资料,故计算精度尚不够理想且无法在区域上检验。

表 10 定西地表各能通量计算结果(Cal)和测值(Meas)间的绝对百分误差(MAPD)

Table 10 The absolute difference (AD) between the derived results(Cal) and measured(Meas) values of land surface energy flux densities at Dingxi station

时间 Time (M-d)	$Q(W/m^2)$			$F(W/m^2)$			$R_n(W/m^2)$			$H(W/m^2)$			$\lambda E(W/m^2)$		
	Cal	Meas	AD	Cal	Meas	AD	Cal	Meas	AD	Cal	Meas	AD	Cal	Meas	AD
7-13	230.3	217.6	12.7	85.7	60.6	25.2	81.3	124.4	43.2	32.1	33.9	1.9	41.1	64.8	23.7
7-16	194.4	166.7	27.8	86.6	53.2	33.4	88.8	95.1	6.3	24.7	20.5	4.1	54.6	62.1	7.5
7-17	303.2	331.0	27.8	88.3	97.1	8.8	179.8	192.4	12.5	29.3	39.0	9.7	132.4	109.8	22.6
7-21	321.8	322.9	1.2	90.9	120.9	30.0	148.2	131.1	17.2	55.8	40.5	15.3	58.4	66.6	8.2
7-23	319.4	324.1	4.6	91.2	119.4	28.2	158.9	132.7	26.2	62.2	59.9	2.3	66.8	70.6	3.8
7-24	288.2	298.6	10.4	91.3	101.2	9.9	143.3	128.1	15.3	62.0	65.5	3.5	57.9	56.9	1.0
7-25	287.0	283.6	3.5	89.9	95.1	5.2	148.3	120.6	27.7	59.8	66.9	7.1	66.0	52.4	13.6
7-28	281.2	296.3	15.0	87.2	98.7	11.6	128.7	130.6	1.8	56.2	60.3	4.1	44.4	49.5	5.1
8-08	200.2	204.9	4.6	65.3	52.0	13.3	87.2	115.9	28.7	26.3	21.8	4.5	44.9	56.8	11.9
平均 Avg.	269.5	271.7	12.0	86.3	88.7	18.4	129.4	130.1	19.9	45.4	45.4	5.8	63.1	65.5	10.6
MAPD	4%			21%			15%			13%			16%		

7 结论

利用卫星遥感估算非均匀陆面的能量输送是当前的热点问题。近年来大气近地层观测技术和地气间能量交换的研究有了很大进展,卫星遥感技术更是日新月异。本文采用 SEBAL 算法,物理基础较为坚实。它为用卫星遥感资料反演陆面过程提供了有力的保证。通过研究得到以下几点认识:

1) 本实验区位于青藏高原、黄土高原和秦岭山地的交界处,地域差别很大。以往尚未研究其能量通量的区域分布特征。我们发现黄土沟壑与植被茂盛的山区能量平衡各分量的分布相反,尤其是半干旱黄土高原,河沟中为灌溉农田波文比小,而梁上植被稀少波文比很大,类似绿洲和沙漠。秦岭山地河谷中植被盖度比山脊小,故山脊波文比小于河谷。此外净辐射和潜热高原东北缘较大。

2) 就不同土地类型而言,净辐射和潜热通量高寒沼泽草甸区最大,沙漠戈壁最小;土壤热通量、感热通量和波文比沙漠戈壁最大,岭南暖温带湿润常绿林区最小,分布合理。

3) 4~8 月 能量平衡各分量除感热通量外都在 6 月达到最大,北部地区则与感热通量一样 7 月下旬最大,波文比大部分地区 5 月较大,8 月最大,6、7 月份最小。

4) 地气温差对感热通量的计算很敏感,我们突破此难点,用统计方法建立地气温差与 T_s 、NDVI 和海拔高度 Z 的经验公式。这样可用卫星资料直接反演地气温差,得到与卫星分辨率相对应的较准确的地气温差值,从而提高了计算感热通量区域分布的精度。

致谢:兰州干旱气象研究所提供卫星资料和定西干旱气象与生态环境试验资料,甘肃省气象信息中心资料室提供辐射和地面常规气象资料。本研究方案曾与马耀明、王介民、钟强教授等进行过有益的讨论,他们提供了宝贵意见和有关文献资料。作者在此深表谢意。

参考文献:

- [1] HU Yinqiao, YANG Xuanli, ZHANG Qiang, et al. The characters of energy budget on the Gobi and Desert surface in Hexi re-

- gion[J]. *Acta Meteor. Sinica*, 1992, 6(1):82-91.
- [2] 胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 黑河实验(HEIFE)的一些研究成果[J]. *高原气象*, 1994, 13(3):225-236.
- [3] MA Yaoming, Ishikawa H, Tsukamoto O, et al. Regionalization of surface fluxes over heterogeneous landscape of the Tibetan plateau by using satellite remote sensing data[J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2003, 81(2):277-293.
- [4] 张强, 曹晓彦. 敦煌地区荒漠戈壁地表热量和辐射平衡特征的研究[J]. *大气科学*, 2003, 27(2):245-253.
- [5] MA Yaoming, 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]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2002, 80(3):485-501.
- [6] 柯晓新, 张旭东, 彭素琴, 等. 旱作春小麦农田蒸散与能量平衡[J]. *气象学报*, 1996, 54(3):348-355.
- [7] 杨兴国, 张强, 王润元, 等. 陇中黄土高原夏季地表能量平衡观测研究[J]. *高原气象*, 2004, 23(6):828-834.
- [8] 钟强. 青藏高原太阳总辐射的计算方法讨论[J]. *高原气象*, 1986, 5(3):197-210.
- [9] 陈添宇, 陈乾. 用卫星资料推算黑河地区地表特征参数[J]. *高原气象*, 1992, 11(4):446-452.
- [10] 吴艾生, 钟强. 黑河实验区下垫面总辐射、地表反射率与太阳高度角的关系[J]. *高原气象*, 1993, 12(2):147-154.
- [11] 王可丽, 钟强, 侯萍. 青藏高原地区 OLR 与地面有效辐射关系分析[J]. *高原气象*, 1991, 10(4):381-390.
- [12] Chodhury B J, Idos S B, Reginato R J. Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by infrared temperature based energy balance equation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1987, 39:283-297.
- [13] Sobrino J A, Raissouni N. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring, application to Morocco[J]. *Int. J. of Remote Sens.*, 2000, 21:353-366.
- [14] 陈乾. 中国西北干旱地区水面蒸发力计算[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 1992, 28(4):66-73.
- [15] 王介民, 高峰, 刘绍民. 流域尺度 ET 的遥感反演[J]. *遥感技术与应用*, 2003, 18(5):75-79.
- [16] Webb E K. Profile relationships; the log-linear range and extension to strong stability[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1970, 96:67-90.
- [17] Businger J A. A note on the Businger-Dyer profiles[J]. *Bound. Layer Meteor.*, 1988, 42:145-151.
- [18] 陈乾. 我国西部降雹的若干气候特征[J]. *高原气象*, 1985, 4(3):262-273.

Estimation of land surface energy flux densities over eastern part of Northwest China with the aid of satellite remote sensing and field observations

CHEN Tian-yu, CHEN Qian, LI Bao-zi

(Gansu Weather Modification Office, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: In this paper, the regional distribution features of the land surface daily mean net radiation flux density, sensible heat flux, latent heat flux, soil heat flux and Bowen ratio during April-August over eastern part of Northwest China are derived from the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), that are aided combining micrometeorological observations over a wheat field at Dingxi station and observations data of 36 automatic and 89 routine weather stations over experimental region with NOAA-16 AVHRR data. Based on land classification the energy flux densities of variant land surface such as the Yellow River irrigated paddy field, spring wheat field, winter wheat field, grass land, forest and marsh land have been estimated. It is shown that the variant growing periods of plants from the south humid evergreen forest through the semi-arid rainfed agriculture region into the north arid desert land surface energy transport are much different. The mean absolute percent difference between the derived results and measured values at Dingxi station is between 4% and 21%. The differences between surface temperature and air temperature ($T_s - T_a$) are sensitive for calculated sensible heat flux. A fitted relationship between ($T_s - T_a$) and ($T_s, NDVI, Z$) was found. The retrievals of regional ($T_s - T_a$) can be derived using satellite data. A difficult problem in calculation was solved, which can improve the estimation of regional sensible heat flux.

Keywords: eastern part of Northwest China; satellite remote sensing; land surface energy flux densities