

黑河实验区地表净辐射区域分布 及季节变化*

马耀明 王介民

(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州 730000)

Massimo Menenti Wim Bastiaanssen

(荷兰陆面、土壤和水综合研究中心, 荷兰瓦格宁根 6700AC)

摘 要 利用卫星遥感信息和地面观测资料, 分析研究黑河实验区地表净辐射的区域分布及季节变化特征。结果表明, 卫星遥感结合地面观测, 首先可以得到较为精确的地表反射率和地表温度分布, 进而得到较为合理的地表净辐射的区域分布和季节变化特征。

关键词 黑河实验 卫星遥感 地表净辐射 区域分布 季节变化

1 引言

中日合作“黑河地区地气相互作用野外观测实验研究”(黑河实验)是 WCRP 与 IGBP 协调组织的一系列大型陆面过程实验之一。该实验研究干旱气候形成和变化的陆面物理过程; 为气候模式的中纬度干旱、半干旱地区水分和能量收支的参数化方案提供观测依据, 以便提高气候模式的预报能力。地面辐射能观测研究是黑河实验中的一个重要组成部分, 对包括实验区某个站及几个站的辐射能研究已取得不少引人注目的成果, 然而, 由于实验区下垫面物理结构的复杂性, 已有的研究对区域尺度上地表辐射状况, 尤其是对作为水热平衡基础的净辐射通量区域分布的分析还不够^[1]。本文的目的就是将卫星遥感技术与黑河实验期间收集的地面资料结合起来, 较为准确地计算该实验区区域尺度上的地表反射率及地表温度, 进而较为合理地估算区域尺度净辐射通量分布及季节变化特征, 以期对大、中尺度陆面过程的合理参数化及地气相互作用的深入研究有所贡献。

2 资料的选取

陆地资源卫星主题绘图仪 (LANDSAT TM) 资料包含 7 个波段的遥感信息, 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 $28.5\text{ m} \times 28.5\text{ m}$, 热红外波段(波段 6)的地面分辨率为 $120\text{ m} \times 120\text{ m}$ 。本文选取 1991 年 7 月 9 日和 1991 年 10 月 29 日晴天两个卫星图象的 LANDSAT TM 数据资料(卫星过境时间为北京时 11 时), 分别代表夏季和近冬季的情况。结合卫星遥感分析, 这里选取黑

1996-04-25 收到, 1997-04-09 收再改稿

* 本研究得到国家自然科学基金和中国科学院兰州高原大气物理研究所所长择优基金的资助

河实验的地面观测资料包括地表反射率、地表温度、地表辐射平衡各分量和植被分布状况等。

3 理论及方法

利用卫星遥感信息和地面观测资料估算地表净辐射通量的区域分布及季节变化的过程可分为两步。第一步, 求取地表特征参数(地表反射率和地表温度); 第二步, 由所得的地表特征参数根据地表辐射平衡过程确定地表净辐射通量。

3.1 区域地表反射率的确定

地表反射率可由 LANDSAT TM 资料结合地面站实测的地表反射率得到。首先由卫星遥感信息求得大气层顶波长 λ 处的半球谱行星反照率(窄带行星反照率)

$$r_p(\lambda) = \frac{\pi K_{\text{TOA}}^{\downarrow}(\lambda) d^2}{K_{\text{out}}^{\downarrow}(\lambda) \cos \varphi_{\text{sun}}} \quad (1)$$

这里假定地气系统的辐射为符合 Lambert(兰伯特)定律的黑体辐射。(1)式中 $K_{\text{TOA}}^{\downarrow}(\lambda)$ 是主题绘图仪遥感的大气层顶的谱辐射率, d 是日地的相对距离, $K_{\text{out}}^{\downarrow}(\lambda)$ 为大气外界平均的窄带太阳辐照度, φ_{sun} 是太阳天顶角。然后对可见光和近红外波段窄带行星反照率加权叠加就可得到逐个像元的宽带行星反照率

$$r_p(x, y) = \int_{0.3}^{3.0} r_p(\lambda) d\lambda = \sum C(\lambda)_i r_p(\lambda)_i, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 7, \quad (2)$$

$C(\lambda)_i$ 是波段 i 的权重因子, $\sum C(\lambda)_i = 1$ 。每一像元点上的地表反射率 $r_0(x, y)$ 是由各地面站实测的 $r_0(x, y)$ 与对应点上的 $r_p(x, y)$ 做线性拟合得到

$$r_0(x, y) = ar_p(x, y) + b. \quad (3)$$

图 1 是黑河实验区 1991 年 7 月 9 日和 1991 年 10 月 29 日的两个个例, 这里选用与卫星过境同一时次的 4 个地面基本站的实测值作为与行星反照率做线性拟合的样本, 其中一个测站在沙漠上, 一个测站在戈壁上, 另外 2 个测站在绿洲上。拟合后得到, 7 月 9 日: $a = 1.5053$, $b = -0.0618$ (相关系数 $R = 0.94$); 10 月 29 日: $a = 1.8314$, $b = -0.1043$

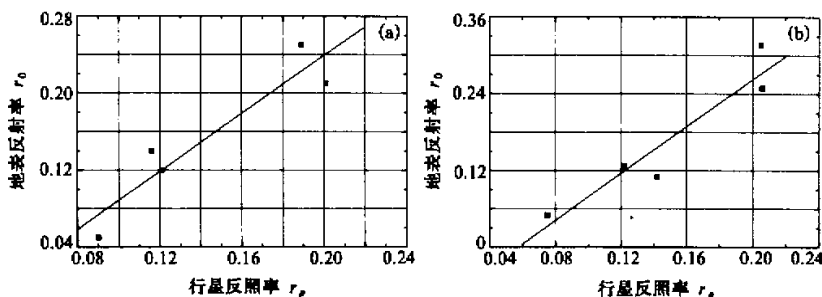


图 1 行星反照率 r_p 相对于地表反射率 r_0 的变化
(a) 1991 年 7 月 9 日; (b) 1991 年 10 月 29 日

($R=0.95$)。对一定的实验区, (3) 式的代表性随地面测站的增加而提高。

3.2 区域地表温度的确定

地表温度由 LANDSAT TM 的热红外波段的谱辐射强度结合地面站实测的地表向上长波辐射计算得到。首先热红外波段辐射强度

$$L_6(x, y) = a_1 + \frac{a_2 - a_1}{255} D_N. \quad (4)$$

这里 a_1 为卫星图象数据读数 $D_N = 0$, a_2 为 $D_N = 255$ 时的热红外辐射强度。其次根据普朗克公式求得地气系统的辐射温度

$$T_{\text{sat}}(x, y) = \frac{C_1}{\ln(C_2 / L_6(x, y) + 1)}, \quad (5)$$

C_1 和 C_2 为经验常数。然后根据斯蒂芬-波尔兹曼定律求得大气层顶向上的长波辐射

$$L_{\text{TOA}}^{\uparrow}(x, y) = \sigma T_{\text{sat}}^4(x, y) \quad (6)$$

而 $L_{\text{TOA}}^{\uparrow}(x, y)$ 反映了地面上每个像元点向上的长波辐射 $L_0^{\uparrow}(x, y)$ 的大小。在 $L_0^{\uparrow}(x, y)$ 与 $L_{\text{TOA}}^{\uparrow}(x, y)$ 之间做拟合就可得到各像元点的向上长波辐射

$$L_0^{\uparrow}(x, y) = c L_{\text{TOA}}^{\uparrow}(x, y) + d. \quad (7)$$

图 2 是黑河实验 1991 年 7 月 9 日和 1991 年 10 月 29 日的个例分析, 由此图可知: $c=1.9190$, $d=528.9931$, $R=0.96$ (1991 年 7 月 9 日) 和 $c=1.8731$, $d=-382.3102$, $R=0.95$ (1991 年 10 月 29 日)。各像元点的地表温度 $T_0(x, y)$ 就可从 $L_0^{\uparrow}(x, y) = \varepsilon_0(x, y) \sigma T_0^4(x, y)$ 得到, 这里的表面比辐射率 $\varepsilon_0(x, y)$ 可认为是植被指数的函数^[2]。对一定的实验区, (7) 式的代表性象 (3) 式一样随地面实测点的增加而提高。

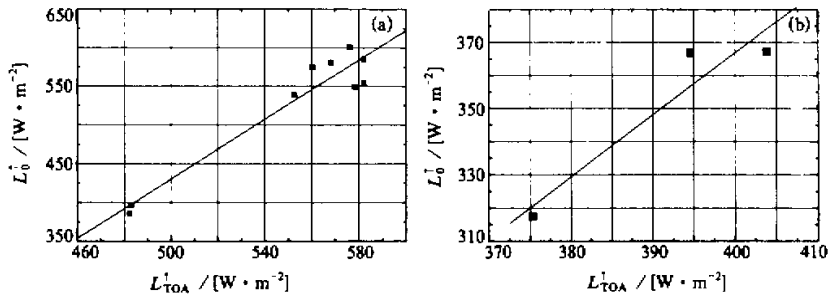


图 2 大气层顶向上的长波辐射 $L_{\text{TOA}}^{\uparrow}$ 与地表向上长波辐射 $L_0^{\uparrow}$ 的关系
(a) 1991 年 7 月 9 日; (b) 1991 年 10 月 29 日

3.3 区域净辐射通量的估算

地表净辐射通量 R_n 的区域分布是由短波净辐射和长波净辐射共同决定的, 即

$$R_n(x, y) = [(1 - r_0(x, y))K^{\downarrow}(x, y) + \varepsilon_a \sigma T_a^4(x, y) - L_0^{\uparrow}(x, y)], \quad (8)$$

式中空气温度 T_a 可由其与地表温度的关系得到^[3], 对黑河实验区 T_0 与 T_a 的拟合关系分

别是: $T_0 - T_a = 0.60T_0 - 9.45$ ($R=0.98$, 1991 年 7 月 9 日) 和 $T_0 - T_a = 0.67T_0 - 5.41$ ($R=0.97$, 1991 年 10 月 29 日), 大气的比辐射率 ε_a 则是大气平均短波透过率 $\bar{\tau}_{su}$ 的函数^[4], 即

$$\varepsilon_a = 1.08(-\ln \bar{\tau}_{su})^{0.265}. \quad (9)$$

4 个例研究及结果分析

作为个例, 以下给出黑河实验区夏季(1991 年 7 月 9 日)和近冬季(1991 年 10 月 29 日)陆地资源卫星主题图仪两个卫星图象数据资料的分析结果。

4.1 黑河实验区地表反射率的区域分布及季节变化

实验区下垫面十分复杂, 戈壁、沙漠与农田交错分布, 这从图 3 中地表反射率分布的不均匀性得到了很好的反映。图 3 (见图版 1) 为实验区夏季和近冬季地表反射率分布图, 共含 3300×3300 个像元点, 每个点对应的地面尺度为 $28.5 \text{ m} \times 28.5 \text{ m}$ 。从地表反射率分布图 3 和分布直方图 4 中可见黑河实验区地表反射率分布有以下特点: (1) 无论夏季还是近冬季, 由于实验区地表状况反差较大, 所以实验区地表反射率的分布范围亦较宽。绿洲地区的地表反射率, 夏季约为 $0.06 \sim 0.13$, 近冬季约为 $0.09 \sim 0.16$ 。戈壁沙漠地区的地表反射率, 夏季约为 $0.19 \sim 0.30$, 近冬季约为 $0.26 \sim 0.36$ 。绿洲与沙漠交界的“混合区”的地表反射率, 夏季约为 $0.14 \sim 0.18$, 近冬季约为 $0.17 \sim 0.24$ 。(2) 夏季地表反射率分布直方图有 2 个峰值(代表值), 较高的一个 $r_0 \approx 0.24$ 对应于戈壁、沙漠地区, 另一个 $r_0 \approx 0.11$ 对应绿洲地区; 近冬季地表反射率分布直方图有 3 个峰值, $r_0 \approx 0.15$ 对应于绿洲地区, $r_0 \approx 0.20$ 对应于“混合区”, 另一个 $r_0 \approx 0.29$ 对应于戈壁、沙漠地区。(3) 区域上地表反射率的平均值, 夏季为 0.19, 近冬季为 0.22。

也就是说, 由于近冬季实验区绿洲农田上的庄稼大都已经收割, 地表基本裸露, 且树叶已落, 所以实验区近冬季的地表反射率, 无论是在绿洲地区, 还是在“混合区”和戈壁、沙漠地区; 无论是其在各个地区的代表值(峰值), 还是在整个区域的平均值都明显地高于夏季。

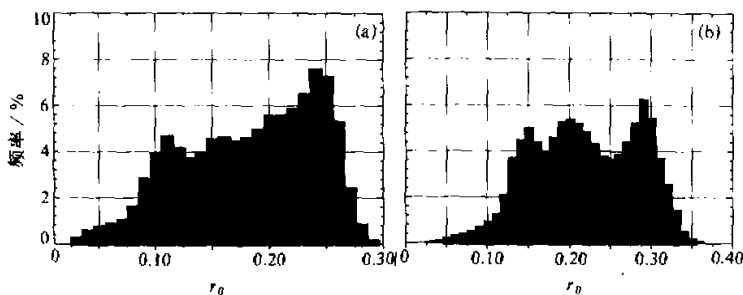


图 4 黑河实验区地表反射率分布直方图

(a) 1991 年 7 月 9 日, 平均值 = 0.19, 标准差 = 0.07; (b) 1991 年 10 月 29 日, 平均值 = 0.22, 标准差 = 0.06

4.2 黑河实验区地表温度的区域分布及季节变化

黑河实验区地表温度夏季及近冬季的分布图与地表反射率分布图类似（图略），图 5 为其分布直方图。夏季地表温度的分布范围比较宽，值也比较高，且有两个明显的峰值，较高的一个 $T_0 \approx 45^\circ\text{C}$ 对应于戈壁、沙漠地区，另一个较低的 $T_0 \approx 15^\circ\text{C}$ 对应于绿洲地区。近冬季的地表温度明显地低于夏季，两者区域平均值相差近 25°C 。近冬季地表温度的分布范围也不如夏季那么宽，这同样是因为近冬季实验区下垫面绿洲上植物枯黄变稀，绿洲与戈壁、沙漠的反差不如夏季那么明显的缘故。

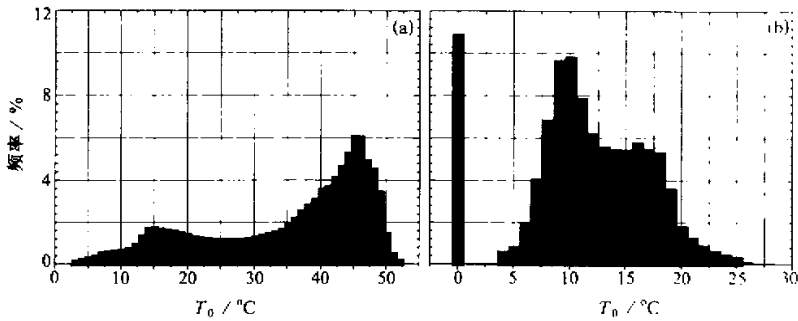


图 5 黑河实验区地表温度分布直方图
(a) 1991 年 7 月 9 日，平均值 = 36.7 ，标准差 = 12.4 ；(b) 1991 年 10 月 29 日，
平均值 = 12.1 ，标准差 = 5.3

4.3 黑河实验区地表净辐射的区域分布及季节变化

利用 3.3 节估算地表净辐射通量的方法得出了黑河实验区地表净辐射的区域分布。图 6a（见图版 II）是实验区夏季地表净辐射分布图，黄-橙-红色区域，除了东南角祁连山区外，主要是绿洲农田和小块林地，地表净辐射较大，约为 $620\sim 760$ （单位为 W/m^2 ，下同）。图中较大范围的紫-深蓝色的区域为干燥的戈壁、沙漠地区，净辐射通量较小，约为 $300\sim 450$ ，而绿洲与戈壁、沙漠交界处的“混合区”（图 6a 中蓝-绿色区域）的净辐射通量则约为 $470\sim 600$ 。从夏季净辐射分布直方图 7a 也可见黑河实验区

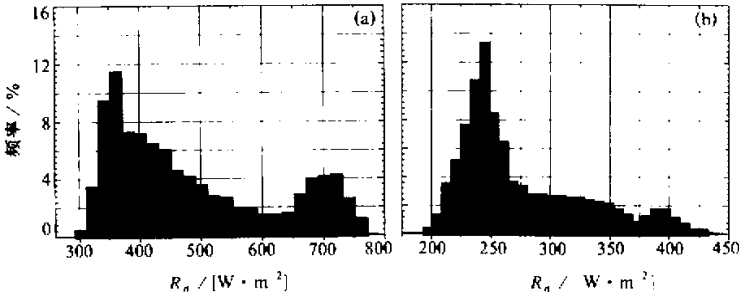


图 7 黑河实验区地表净辐射分布直方图
(a) 1991 年 7 月 9 日，平均值 = 471.0 ，标准差 = 126 ；(b) 1991 年 10 月 29 日，
平均值 = 277.6 ，标准差 = 54.4

由于夏季地表状况反差较大,净辐射通量分布范围也较宽,约从 300~760 之间变化,且该图中有两个明显的峰值,较小的一个 $R_n \approx 370$ 对应于戈壁、沙漠地区,另一个 $R_n \approx 700$ 对应于绿洲地区,夏季实验区净辐射通量的区域平均值约为 471。

近冬季(1991 年 10 月 29 日)由于实验区绿洲上植被覆盖减少,地表反射率变大,所以其净辐射与夏季相比差异十分明显:(1)净辐射通量分布范围不象夏季那么宽,约为 180~430。绿洲地区(图 6b 中蓝-绿-黄色区域)的净辐射尽管仍比戈壁、沙漠地区(图 6b 中紫-深蓝色区域)大,但其量值已明显小于夏季,约为 300~400。(2)直方图中对应于戈壁、沙漠地区的峰值约为 240,明显地小于夏季戈壁、沙漠上 $R_n \approx 370$ 的峰值;而对应于绿洲地区的峰值约为 390,也仅为夏季绿洲地区的 58%。(3)近冬季与夏季实验区净辐射通量的平均值相差近 193。

4.4 计算结果合理性检验

上面得到的地表反射率、地表温度和地表净辐射等区域分布的合理性可通过地面站的实测值来检验。由于在各分布图上较难确定地面站的精确位置,所以这里取各分布图上地面站坐标(各分布图中“+”符号位置)附近 5×5 个像元点矩形面上的平均值与地面站的实测值作比较,其结果列在表 1 中。

表 1 黑河实验区地表特征参数及净辐射通量的卫星推算值与实测值的比较

1991 年 7 月 9 日						
项 目	r_0		$T_0 / ^\circ\text{C}$		$R_n / (\text{W} \cdot \text{m}^2)$	
	测量值	推算值	测量值	推算值	测量值	推算值
测 站						
沙漠	0.25	0.22	44.8	46.5	392.6	380.5
临泽(绿洲)	0.12	0.11	17.8	16.5	625.7	680.5
化音(戈壁)	0.21	0.20	46.5	43.7	423.6	416.0
张掖(绿洲)	0.14	0.12	22.8	19.0	623.7	683.5
1991 年 10 月 29 日						
沙漠	0.32	0.28	17.5	17.0	236.7	225.5
临泽(绿洲)	0.11	0.14	11.3	8.9		322.4
化音(戈壁)	0.25	0.26	17.1	15.8	254.1	236.0
张掖(绿洲)	0.13	0.13	8.6	7.9	354.7	364.0

由表 1 可见,卫星推算的地表反射率在夏季与近冬季都和地面站实测值基本接近,相对误差均在 10% 左右,并且这些结果与季国良的结果^[5]及吴艾笙、钟强用 NOAA 卫星所得的结果^[6]基本一致;地表温度的卫星推算值与地面站实测值的相对误差亦在 10% 左右;而地表净辐射通量卫星推算值的相对误差,无论是在戈壁、沙漠地区还是在绿洲地区均小于 10%,并且在戈壁、沙漠地区的卫星推算值更接近实测值。

5 结语

卫星遥感技术在研究地表净辐射区域分布及季节变化时有其独特的作用,它具有获取资料范围广且直观的特点。本文将卫星遥感资料与地面观测的“真值”相结合,首先得到了黑河实验区地表特征参数(地表反射率、地表温度)的区域分布及季节变化特征,

进而推算得到了实验区地表净辐射通量的区域分布及季节变化特征, 所得结果基本上是可信的。

本文是基于陆地资源卫星主题绘图仪 (LANDSAT TM) 资料基础上分析的, LANDSAT TM 尽管有其分辨率高的特点, 但因其资料时次较少, 所以用其做季节变化甚至日变化分析尚显不足, 这就必须借助于其他卫星, 如 NOAA 系列地球静止卫星 (GMS) 等的资料来综合分析, 这也将是下一步工作的重点。

参 考 文 献

- 1 胡隐樵、高由禧、王介民等, 1994, 黑河实验 (HEIFE) 的一些研究结果, 高原气象, 13(3), 225~236.
- 2 Bastiaanssen, W. G. M., D. H. Hoekman and R. A. Roebeling, 1994, A methodology for the assessment of surface resistance and soil water storage variability at mesoscale based on remote sensing measurements, IAHS Special Publications No. 2, IAHS Press Wallingford, U.K., 66.
- 3 Bastiaanssen, W. G. M., 1995, Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain, Ph. D. Thesis, Wageningen Agriculture University, the Netherlands, 158~161.
- 4 Bastiaanssen, W. G. M., 1995, Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain, Ph. D. Thesis, Wageningen Agriculture University, the Netherlands, 143~144.
- 5 季国良、邹基玲, 1994, 干旱区绿洲和沙漠辐射收支的季节变化, 高原气象, 13(3), 323~329.
- 6 吴艾笙、钟强, 1992, 黑河地区地表反射率与植被指数的季节变化, 高原气象, 11(4), 155~162.

The Distribution and Seasonal Variation of Regional Net Radiation in HEIFE Area

Ma Yaoming, Wang Jiemin

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Massimo Menenti and Wim Bastiaanssen

(The Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, P.O. Box 125,

6700 AC Wageningen, The Netherlands)

Abstract The distribution and seasonal variation of regional net radiation in HEIFE area were analyzed with the aid of satellite remote sensing and field observation in this paper. The results show that the reasonable regional distribution and seasonal variation of surface albedo, surface temperature and net radiation can be obtained with the aid of remote sensing and the field observation.

Key words HEIFE satellite remote sensing net radiation of land surface regional distribution seasonal variation