

文章编号:1006-7639(2004)-04-0010-07

卫星遥感确定沙特阿拉伯吉达地区非均匀地表 区域地表参数和能量通量

马耀明^{1,2}, 马伟强², 胡晓², 田辉², 李茂善², 王介民², 文军², 高峰²

(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, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃兰州 730000)

摘要:对临海沙漠地区非均匀地表区域地表能量通量和蒸发(蒸散)的研究, 是一个十分重要但又是一个难点问题。本文提出了 1 个基于卫星遥感和地面观测的参数化方案, 并把其应用于沙特阿拉伯吉达地区, 利用 1 个景的陆地资源卫星 Landsat-7 ETM⁺ 资料进行了分析研究, 得到了一些有关临海沙漠地区非均匀地表区域地表特征参数、植被参数和地表能量通量的新概念。最后讨论了所提出的参数化方案的适用范围和需改进之处。

关键词:区域地表能量通量; 临海沙漠地区; Landsat ETM; 地面观测

中图分类号: P407

文献标识码: A

引言

能量与水分循环研究是近 20 多年来国内外大气和地理科学家共同关注的重大课题。而作为临海能量与水分循环研究显得尤为重要。这是因为一方面海区有大量的海水有利于蒸发, 另一方面临海的沙漠地区又十分缺水。为了清楚地认识这一复杂的机理, 更好地为这一类地区的人类与环境的共同可持续发展有所贡献, 日本文部科学省在沙特阿拉伯吉达(Jiddah)地区开展了“RR2002(Research Revolution 2002)”计划, 在这一计划中, 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。相比较而言, 卫星遥感参数化又是较好的方法^[1]。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^[1]。本文的目的是介绍利用 Landsat-7 ETM⁺ 资料和地面观测资料估算非均匀地表区域能量通量的方法, 以及其对沙特阿拉伯吉达地区地表特征参数、植被参数

和地表能量通量的估算结果。

1 卫星遥感资料和地面观测资料

Landsat-7 ETM⁺ 包含 8 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 28.5 m×28.5 m, 热红外波段(波段 6)的地面分辨率为 60 m×60 m, pan 波段分辨率为 15 m。这里选取 2003 年 1 月 10 日一个景的 ETM⁺ 资料作为个例来分析(卫星过境时试验区天气晴好)。

2 参数化方案

利用 Ma 等提出的利用 Landsat-7 ETM 资料结合地面观测推算区域地表能量通量的参数化方案^[2-4]。第一步, 由卫星遥感资料和地面观测资料, 通过辐射传输 MODTRAN 模式^[5], 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^[6]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的地表能量通量(净辐射通量、土壤热通量、感热通量和潜热通量)。

收稿日期: 2004-11-15; 改回日期: 2004-12-02

基金项目: 国际合作课题“Research Revolution 2002”(RR2002-6)和中国科学院“知识创新工程”课题(CACX3-SW-329 和 CACX3-SW-339)资助

作者简介: 马耀明(1964-), 男, 山西夏县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 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

2.1 净辐射通量

区域净辐射通量可由以下方程求得:

$$R_n(x, y) = (1 - r_0(x, y)) \cdot K_{\downarrow}(x, y) + L_{\downarrow}(x, y) - \epsilon_0(x, y) \sigma T_{\text{sfc}}^4(x, y) \quad (1)$$

这里 $r_0(x, y)$ 是地表反射率, $T_{\text{sfc}}(x, y)$ 是地表温度, $\epsilon_0(x, y)$ 是地表比辐射率, $K_{\downarrow}(x, y)$ 和 $L_{\downarrow}(x, y)$ 分别是向下的短波和长波辐射。 $\epsilon_0(x, y)$ 将由 Valor 和 Caselles 的模式求得^[7], 也就是说

$$\epsilon_0(x, y) = \epsilon_v(x, y) P_v(x, y) + \epsilon_g(x, y) (1 - P_v(x, y)) + 4 < \epsilon > (1 - P_v(x, y)) P_v(x, y) \quad (2)$$

这里 ϵ_v 和 ϵ_g 分别为植被和裸土的比辐射率, 而植被覆盖度^[8]

$$P_v(x, y) = \left[\frac{NDVI(x, y) - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right]^2 \quad (3)$$

这里 $NDVI_{\max}$ 和 $NDVI_{\min}$ 分别为一特定区域内的最大和最小标准差值植被指数。等式(1)中向下的短波辐射 $K_{\downarrow}(x, y)$ 和向下的长波辐射 $L_{\downarrow}(x, y)$ 可由 MODTRAN 模式得到^[11]。对 Landsat-5 TM 和 Landsat-7 ETM 资料而言, 为了克服利用经验关系的不足, 我们引进了一种四流模式^[9-10]来做大气校正, 从而得到了区域地表反射率 $r_0(x, y)$ ^[2-4]。区域地表温度 $T_{\text{sfc}}(x, y)$ 可从 Landsat-7 ETM 第 6 波段 (10.2 ~ 12.5 μm) 的谱辐射得到^[2-4]。

2.2 土壤热通量

由于在土壤热通量定义式中 ($G_0(x, y) = \rho_s C_s [T_{\text{sfc}}(x, y) - T_{\text{soil}}(x, y)] / r_{\text{sh}}(x, y)$), 土壤温度 $T_{\text{soil}}(x, y)$ 和土壤热输送阻尼 $r_{\text{sh}}(x, y)$ 的难以确定性, 所以这里提出区域土壤热通量 $G_0(x, y)$ 可由一种基于调整土壤植被指数 (MSAVI^[6]) 的算法, 即

$$G_0(x, y) = R_n(x, y) \cdot (T_{\text{sfc}}(x, y) / r_0(x, y)) \cdot (a + b\bar{r}_0 + c\bar{r}_0^2) \cdot [1 + d\text{MSAVI}(x, y)^e] \quad (4)$$

这里常数 a, b, c, d, e 和日平均反射率 \bar{r}_0 可由野外观测得到, 由于吉达地区下垫面与黑河试验区基本相同, 所以这里我们直接用“黑河试验”的结果^[2], 也就是说,

$$G_0(x, y) = R_n(x, y) \frac{T_{\text{sfc}}(x, y)}{r_0(x, y)} (0.00025 + 0.00436 \bar{r}_0 + 0.00845 \bar{r}_0^2) [1 - 0.979 \text{MSAVI}(x, y)^4] \quad (5)$$

而

$$\text{MSAVI}(x, y) =$$

$$\frac{2r_4(x, y) + 1 - \sqrt{[2r_4(x, y) + 1]^2 - 8[r_4(x, y) - r_3(x, y)]}}{2} \quad (6)$$

这里 r_3 和 r_4 分别为 ETM 第 3 和第 4 波段的地表反射率。

2.3 感热通量

区域感热通量 $H(x, y)$ 可由下式得到

$$H(x, y) = \rho C_p k^2 u(x, y) \cdot \frac{[T_{\text{sfc}}(x, y) - T_a(x, y)]}{\left[\ln \frac{z - d_0(x, y)}{Z_{0m}(x, y)} + kB^{-1}(x, y) - \Psi_h(x, y) \right] \cdot \left[\ln \frac{z - d_0(x, y)}{Z_{0m}(x, y)} - \Psi_m(x, y) \right]} \quad (7)$$

基于能量守恒原理, 要模拟得到大尺度的感热通量, 一个直接的方法就是把不同小尺度或不同点的结果加权平均。这里用“混和高度假设”^[11], 即

$$H(x, y) = \rho C_p k^2 u_B \cdot \frac{[T_{\text{sfc}}(x, y) - T_a(x, y)]}{\left[\ln \frac{z_B - d_0(x, y)}{Z_{0m}(x, y)} + kB^{-1}(x, y) - \Psi_h(x, y) \right] \cdot \left[\ln \frac{z_B - d_0(x, y)}{Z_{0m}(x, y)} - \Psi_m(x, y) \right]} \quad (8)$$

这里 z_B 为混和高度, u_B 为混和高度处的风速。 z_B 和 u_B 可以由试验或数值模拟得到。本文中的 z_B 和 u_B 将由无线电探空测得。等式(8)中的 $T_a(x, y)$ 为参考高度处的区域空气温度分布, 这里把下垫面分成海面 and 沙漠化地区, 即合 $T_{a-\text{海面}}(x, y)$ $T_{a-\text{沙漠}}(x, y)$ 。 $Z_{0m}(x, y)$, 既包括山体的影响, 又包括低植被 (例如短草), 这里我们用 Taylor 模式^[12]来确定。而等式(8)中的零平面位移 $d_0(x, y)$ 将由 Raupach 模式^[13]得到, 即

$$1 - \frac{d_0(x, y)}{h(x, y)} = \frac{1 - \exp(-\sqrt{c_{di} LAI}(x, y)})}{\sqrt{c_{di} LAI}(x, y)} \quad (9)$$

这里的叶面指数 LAI 可由李建龙等和 Ma 提出的方法^[1, 14]得到, 即

$$LAI = -\frac{1}{2k} \ln \left(\frac{r - r_v}{r_s - r_v} \right) \quad (10)$$

这里 r 为地表反射率, r_s 和 r_v 分别是一特定区域内叶面指数最小和最大时的地表反射率, k 为常数。等式(8)中的热输送附加阻尼 $kB^{-1}(x, y)$ 则可由 $kB^{-1}(x, y)$ 与 $T_s(x, y)$ 关系得到^[1-2]。等式(8)的 $\Psi_h(x, y)$ 和 $\Psi_m(x, y)$ 为稳定度修正函数, 可有 Paulson 模式^[15]和 Webb^[16]模式得到, 即对不稳定大气

$$\begin{cases} \Psi_m(x, y) = 2 \ln[(1+X)/2] + \ln[(1+X^2)/2] - 2 \arctan(X) + 0.5\pi \\ \Psi_h(x, y) = 2 \ln[(1+X^2)/2] \end{cases} \quad (11)$$

这里 $X = \{1 - 16[z - d_0(x, y)]/L(x, y)\}^{0.25}$ 。对稳定大气

$$\Psi_m(x, y) = \Psi_h(x, y) = -5 \frac{z - d_0(x, y)}{L(x, y)} \quad (12)$$

稳定度函数 $[z - d_0(x, y)]/L(x, y)$ 可由 Businger 的方法得到^[17]:

$$\begin{cases} [z - d_0(x, y)]/L(x, y) = R_i(x, y) \text{ (不稳定)} \\ [z - d_0(x, y)]/L(x, y) = R_i(x, y)/[1 - 5.2R_i(x, y)] \text{ (稳定)} \end{cases} \quad (13)$$

这里 $R_i(x, y)$ 为 Richardson 数。

2.4 潜热通量

区域潜热通量分布 $\lambda E(x, y)$ 可由能量平衡方程得到, 即

$$\lambda E(x, y) = R_n(x, y) - H(x, y) - G_0(x, y) \quad (14)$$

3 个例研究及验证

图 1 和图 2 是“RR2002 计划”试验区的地表特征参数、植被参数及地表热通量分布。图 3 为其频率分布(直方图)。表 1 为推算结果与实测结果的比较。这里把平均绝对百分比误差(MAPD)作为一种指标来确定推算值($H_{推算(i)}$)与实测值($H_{实测(i)}$)误差, 即

$$MAPD = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|H_{推算(i)} - H_{实测(i)}|}{H_{实测(i)}} \right) \quad (15)$$

由于在分布图上较难确定地面站的精确位置, 所以这里取每个分布图上地面站坐标(分布图中“+”符号位置)附近 5×5 个象元点矩形面上的平均值与地面站实测值作比较。结果显示: (1)推算得到的试验区地表特征参数(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)与试验区的地表状况十分吻合。由于试验区地表状况差异很大, 所以这些通量的分布范围都很宽, 即 NDVI: 0.00~0.70, MSAVI: 0.00~0.75, 植被覆盖度 P_v : 0.00~1.00, LAI: 0.00~1.10, 地表反射率: 0.00~0.44, 地表温度: 10℃~50℃, 净辐射通量 R_n : 90~570 W/m², 土壤热通量 G_0 : 0~280 W/m², 感热通量: 0~315 W/m², 潜热通量(E): 0~440 W/m²; (2)推算得到的试验区的地表温度和地表反射率与地面观测值较为接近, 平均绝对误差(MAPD)都 < 6%; (3)推算得到的试验区区域净辐射通量与实测值相当接近(MAPD < 3%); (4)基于 MSAVI 的估算区域土壤热通量方

法对这一地区非均匀下垫面是适用的, 推算得到的“平均绝对误差(MAPD) < 6.87%, (5)推算得到的试验区的感热通量和潜热通量都与观测值十分接近(MAPD 约为 6%)。

表 1 推算的结果(Cal.)与实测结果(Meas.)的比较

Tab.1 Comparison of the derived results (Cal.) with those measured values (Meas.)

$r_0(-)$			$T_{st}(^{\circ}C)$			$R_n(W \cdot m^{-2})$		
Cal.	Meas.	MAPD	Cal.	Meas.	MAPD	Cal.	Meas.	MAPD
0.180	0.171	5.26%	38.0	36.03	4.68%	307.0	316.2	2.91%
$G_0(W \cdot m^{-2})$			$H(W \cdot m^{-2})$			$\lambda E(W \cdot m^{-2})$		
Cal.	Meas.	MAPD	Cal.	Meas.	MAPD	Cal.	Meas.	MAPD
70.0	65.5	6.87%	149.0	159.5	6.60%	64.0	67.5	5.18%

4 结束语

本文利用卫星遥感与地面观测相结合的手段得到了“RR2002 计划”试验区(沙特阿拉伯吉达地区)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), 所得结果是基本可信的。

由于“RR2002 计划”试验区缺乏植被参数的观测, 故而推算得到的植被参数不能得到检验, 这一点在以后的陆面过程试验中应该引起足够的重视。

致谢: 本研究的部分工作是在日本京都大学防灾研究所和日本的三菱公司研究所完成的。作者非常感谢京都大学 H. Ishikawa 副教授和 H. Ueda 教授及日本的三菱公司研究所 R. Ohba 博士对本工作的全力支持。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] Berk A, Bernstein L S, Robertson D C. MODTRAN: A moderate resolution model for LOTRAN 7. 1989, GL - TR - 89 - 0122.
- [6] Qi J, Chehbouni A, Huete A R, et al. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48: 119 - 126.
- [7] Valor E, Caselles V. Mapping land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and South American areas[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 57:167 - 184.
- [8] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62: 241 - 252.
- [9] Verhoef W. Theory of radiative transfer models applied in optical remote sensing of vegetation canopies[D]. Netherlands: Remote Sensing Department of National Aerospace Laboratory, 1997, 1 - 306.
- [10] 文军. 卫星遥感陆面参数及其大气影响校正研究[D]. 兰州: 中国科学院兰州高原大气物理研究所, 1999, 28 - 29.
- [11] Mason P. The formation of areally averaged roughness lengths [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1988, 114:399 - 420.
- [12] Taylor P A, Sykes R I, Mason P J. On the parameterization of drag over small scale topography in neutrally stratified Boundary flow[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1994, 48:409 - 422.
- [13] Raupach M R. Simplified expressions for vegetation roughness length and zero - plane displacements as functions of canopy height and area index[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1994, 71:211 - 216.
- [14] 李建龙, 黄敬峰, 王秀珍. 草地遥感[M]. 北京: 气象出版社, 1997. 144 - 151.
- [15] Paulson C A. The mathematic representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1970, 9:856 - 861.
- [16] Webb E K. Profile relationships: the log - liner range and extension to strong stability[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1970, 96:67 - 90.
- [17] Businger J A. A note on the Businger - Dyer profiles[J]. *Boundary - Layer Meteorology*, 1988, 42: 145 - 151.

Determination of Regional Land Surface Parameters and Heat Fluxes over Heterogeneous Landscape of Jiddah Area of Saudi Arabia by Using Satellite Remote Sensing Data

MA Yao - ming^{1,2}, MA Wei - qiang², HU Xiao², TIAN Hui², LI Mao - shan², WANG Jie - min²,
WEN Jun², GAO Feng²

(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, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Dealing with the regional land surface heat fluxes over heterogeneous landscape of desertification area near sea is very important and not an easy problem. In this study, a parameterization method based on Landsat - 7 ETM⁺ data and field observations is described and tested for deriving the regional land surface variables, vegetation variables and land surface heat fluxes over heterogeneous landscape. As case study, the method is applied to Jiddah area of Saudi Arabia. The regional distributions of surface reflectance, NDVI, MSAVI, vegetation coverage, LAI, surface temperature, net radiation, soil heat flux, sensible heat flux and latent heat flux have been determined over Jiddah area. The derived results have been validated by using the "ground truth". The results show that the more reasonable regional distributions of land surface variables (surface reflectance, surface temperature), vegetation variables (MSAVI and vegetation coverage), net radiation, soil heat flux and sensible heat flux can be obtained by using the method proposed in this study. Further improvement of the method is also discussed.

Key words: regional land surface heat flux; desertification area near sea; Landsat ETM; field observation

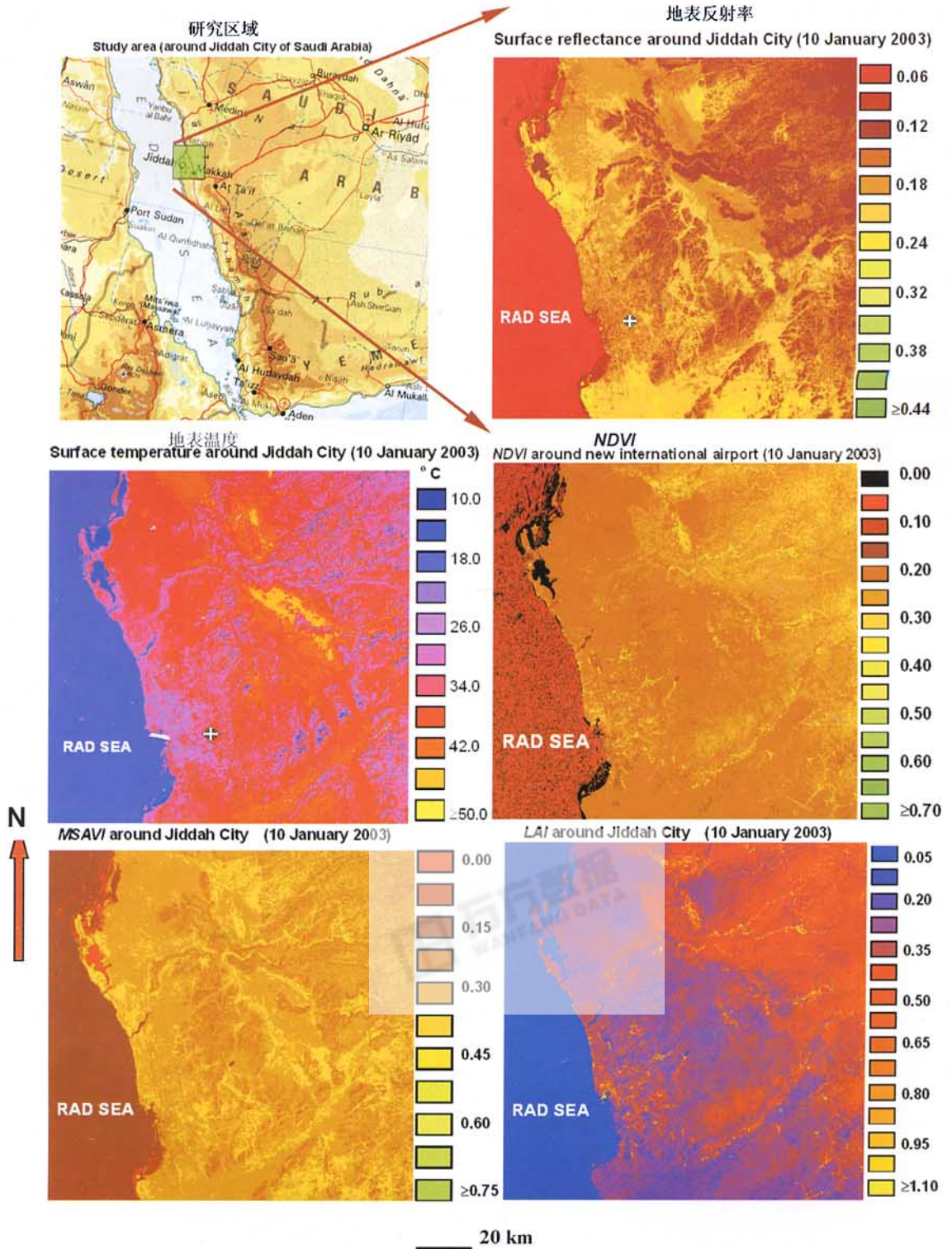


图1 “RR2002计划”试验区地表特征参数与植被参数分布

Fig.1 Surface variables and vegetation variables around “RR2002 Plan” experimental area

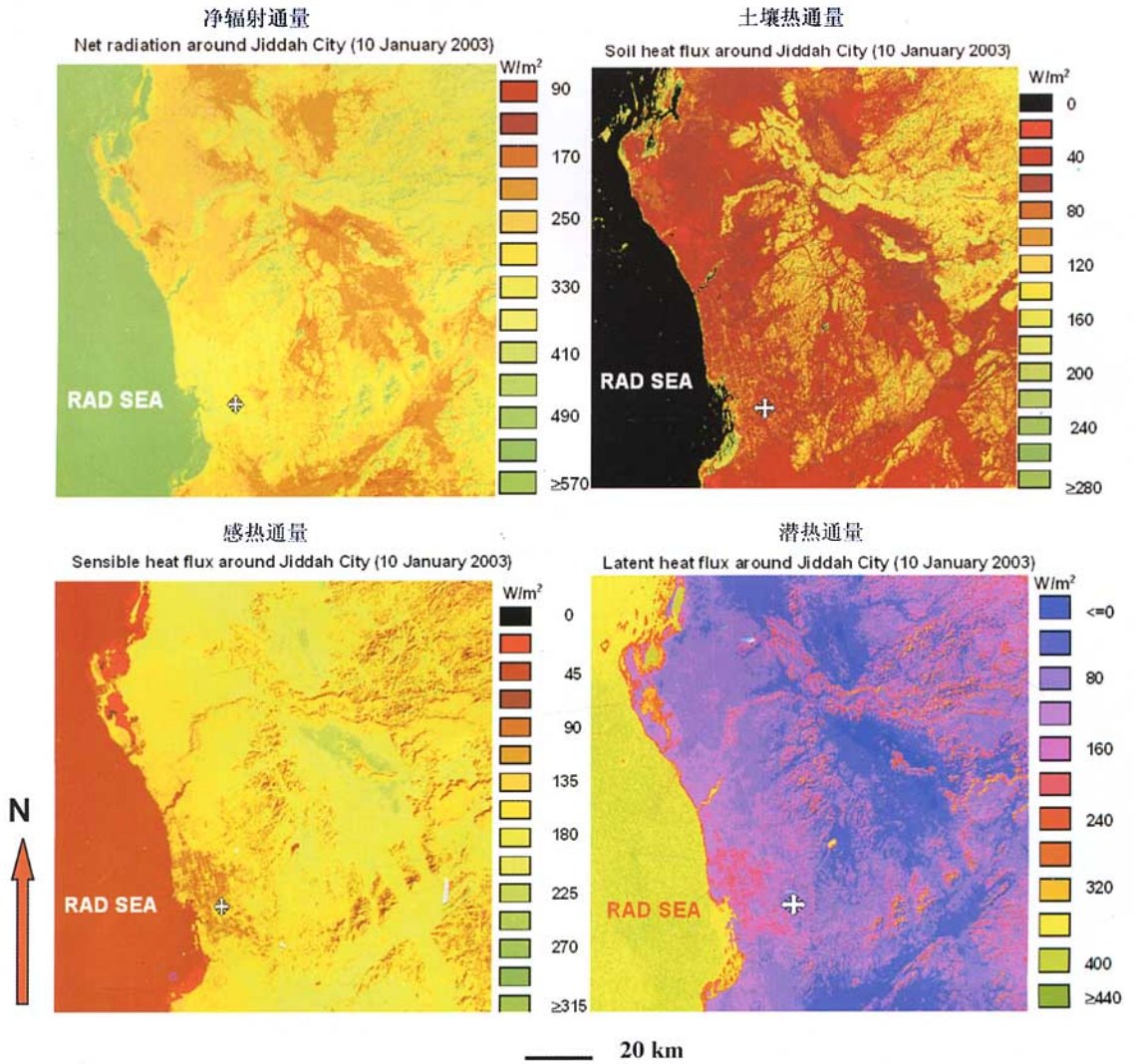


图 2 “RR2002 计划” 试验区地表能量通量分布
 Fig.2 Surface heat fluxes around “RR2002 Plan” experimental area

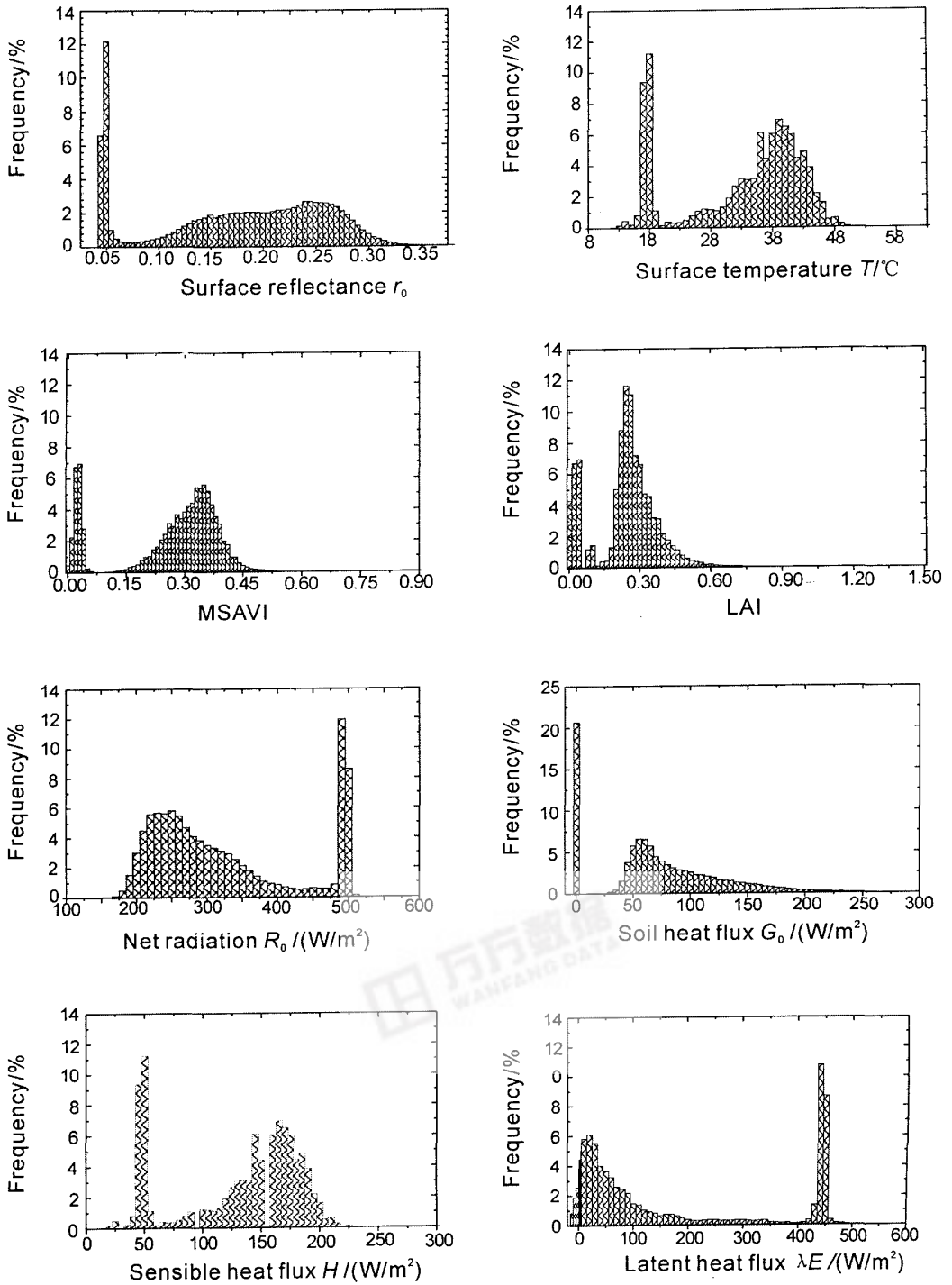


图3 “RR2002计划”试验区地表特征参数、植被参数和地表能量通量的频率分布

Fig.3 Frequency distributions of surface variables, vegetation variables and land surface heat fluxes around “RR2002 Plan” experimental area