

黑河实验区的地表反射率 与植被指数*

吴艾笙 钟 强

(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州 730000)

提 要

本文利用1988年9月黑河地区地气相互作用观测实验研究预试验期NOAA-AVHRR资料讨论了从晴天行星反射率推算地表反射率的方法, 分析了与水、热收支有密切关系的下垫面参数——地表反射率与植被指数的分布特征及它们之间的经验关系。

关键词: 地表反射率; 植被指数; 黑河。

一、引 言

黑河地区地气相互作用观测实验研究是在河西走廊黑河流域中段一个 $70 \times 90 \text{ km}^2$ 范围的实验区内进行以水汽和热量交换为中心的地-气相互作用综合观测实验。实验区的下垫面十分复杂, 戈壁、沙漠与农田、绿洲交错分布。在实验区内, 对地气间水汽和热量交换有重要影响的地表反射率和植被状况(植被指数)的空间变化十分强烈^[1]。为了得到实验区内地表反射率与植被指数的空间分布, 比较理想的方法是应用卫星遥感资料。本文利用1988年9月黑河实验预试验期NOAA-10的晴天AVHRR资料, 分析了实验区的地表反射率与植被指数及它们之间的经验关系, 为实验区水、热收支面积平均的估算提供必要的下垫面参数。

二、资 料

本文用于推算地表反射率与植被指数的资料为1988年9月3日与4日NOAA-10 AVHRR/LAC的可见光通道1($0.58-0.68 \mu\text{m}$)与近红外通道2($0.725-1.1 \mu\text{m}$)的反射率资料, 其星下点的分辨率为 1.1 km 。卫星过境时间约为地方时7:30。这两次过境时, 实验区碧空无云, 但卫星观测角有较大差别, 这对分析观测角对测量值的影响有较好的代表性。选取资料的覆盖范围为 $99^\circ 30' - 101^\circ 00' \text{ E}$, $38^\circ 40' - 39^\circ 40' \text{ N}$, 基本上覆盖了整个实验区, 如图1所示。我们也分析了预试验期NOAA-9的资料, NOAA-9的过境时间约为地方时15:30, 这时太阳天顶角较小, 照理, 这时反射率观测的代表性要好一些。但Brest和Rossow^[2]工作指出, 由于NOAA-9 AVHRR传感器的衰退, 通道1反射率测量值随时间明显下降。我们的分析也证实了这一现象。若不

1990年7月15日收到, 1991年2月26日定稿。

* 本文是国家自然科学基金委员会资助的“黑河地区地气相互作用观测实验研究”重大项目的研究成果之一。

对 NOAA-9 的资料进行归一化处理, 其资料是无法用来定量分析的, 所以本文未选用。由于 NOAA-7 的观测被证实有较好的代表性, 它被 ISCCP 采纳为 1983 年 2 月以后各个 NOAA 卫星的归一化标准^[1]。为了检验 NOAA-10 资料的可靠性, 我们也分析了 1983 年 7 月 13 日实验区 NOAA-7 的资料, 比较结果表明 NOAA-10 与 NOAA-7 的观测有很好的—致性。

三、地表反射率

文献[3,4,5]曾从不同角度讨论了从晴天行星反射率的卫星测量值推算地表反射率的方法, 归纳起来, 它涉及以下几个方面:

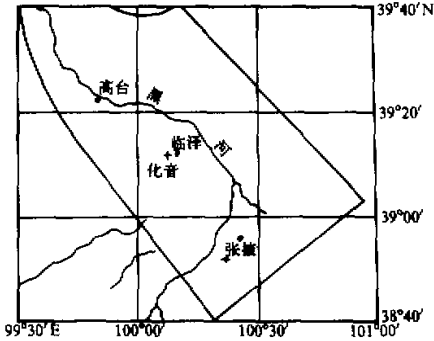


图1 资料覆盖范围和实验区示意图
“+”张掖和化音两个测站的位置

1. 反射辐射各向异性的订正

通道 1 与通道 2 的观测值(count)经过定标与太阳天顶角订正可得到各向同性假定下的反射率, 称之为观测反射率。实际上, 由于反射辐射的各向异性, 观测反射率强烈地依赖于太阳—目标物—探测器之间的相对位置, 即依赖于卫星观测角与太阳天顶角。根据我们对 9 月 3 日与 4 日相邻两天资料的分析, 由于卫星观测角的不同(相对于实验区, 这两天卫星天顶角相差约 25°), 观测反射率相差可达 0.07^[6]。所以, 对观测反射率进行各向异性订正是绝对必需的。本文采用了 Taylor 和 Stowe^[7] 根据 Nimbus-7/ERB 观测实验得到的各向异性订正函数按下式进行订正:

$$\alpha_i' = \alpha_i / f(\theta, \varphi, \theta_0), \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

式中 α_i 、 α_i' 分别为订正前与订正后 1、2 通道的反射率, f 为依赖于太阳天顶角 θ_0 、卫星天顶角 θ 与卫星方位角 φ 的订正函数。订正后, 相邻两天反射率的差可降至 0.02 以下, 大大改进了资料的代表性。关于实验区反射率资料各向异性订正的详细讨论请参看文献[6]。

2. 从窄带反射率到宽带反射率的换算

AVHRR 通道 1 与 2 测得的反射率为可见光与近红外波段两个窄带内的反射率。从计算辐射能收支的目的出发, 必须考虑从窄带反射率的测量值换算成宽带(约为 0.24—4.2 μm)行星反射率。若简单地用可见光窄带反射率代替宽带反射率, 很易导致对冰雪反射率的过高估计和对植被反射率的过低估计。钟强等^[8]根据辐射传输模式对一系列大气廓线样本进行模拟计算得到了适用于青藏高原地区的经验换算关系。本文将采用 Wydick 等^[9]根据 Nimbus-7/ERB 的宽带资料与 NOAA-7/AVHRR 的窄带资料用复回归分析得到的经验关系

$$\alpha_p = A_0 + A_1 \alpha_1^* + A_2 \alpha_2^* \quad (2)$$

式中 α_1^* 、 α_2^* 分别为经过各向异性订正的通道 1 与 2 的窄带反射率, α_p 为宽带行星反射率, A_0 、 A_1 和 A_2 为与下垫面类型有关的回归系数。表 1 列出了对应于下垫面为植被(第 1 组)与沙漠(第 2 组)的回归系数。由于实验区内这两种下垫面交错分布, 在应用(2)式进行换算前, 我们必须确定一个判据, 对每个扫描象素进行检测, 确定在换算时选用哪一组系数。根据我们对 1983 年 7 月 13 日, 1988 年 9 月 3 日和 4 日的资料分析, 在典型的戈壁、沙漠地区, 由 α_2/α_1 定义的比值植被指数 $Q < 1.2$, 而在绿洲 $Q > 1.5$ 。为了选择一临界值作为判据, 我们以实验区中部复杂下垫面的象素(40×40)为样本, 对每个象素分别用第 1 组与第 2 组系数计算宽带反射率 $\alpha_p^{(1)}$ 与 $\alpha_p^{(2)}$ 的比值 $P = \alpha_p^{(2)}/\alpha_p^{(1)}$, 并分析 P 与 Q 的对应关系(如图 2 所示), 选择与 $P=1$ 对应的 Q 值。图 2 表明, 对具有高植被指数的象素, 若用第 2 组系数代替第 1 组系数, 或反之, 对具有低植被指数的象素, 用第 1 组系数代替第 2 组系数, 都会导致宽带反射率的计算值偏低。当 $Q \approx 1.25$ 时, $P \approx 1$, 即用两组不同系数计算的结果基本相同, 所以我们确定 $Q = 1.25$ 为判据, 当 $Q > 1.25$ 时用第 1 组系数, 反之用第 2 组系数。

表 1 方程(2)中的回归系数^[9]

下垫面类型	A_0 (%)	A_1	A_2
1. 植被	-0.702	0.361	0.732
2. 沙漠	9.321	0.874	-0.072

文献[9]也介绍了利用辐射传输模式进行数值模拟得到的回归系数, 把它与表 1 根据观测实验得到的回归系数比较, 前者对宽带行星反射率估计偏低。我们在应用文献[8]给出的回归系数时, 也发现有同样的问题。所以表 1 给出的回归系数的应用是对换算关系的一个很好改进。

3. 考虑大气影响的订正

由于分子与气溶胶对太阳辐射的吸收与散射作用, 大气层有缩小地表反射率极端值的效应, 即增加(减小)低(高)反射率面的行星反射率。地表反射率 α_s 与晴天行星反射率之间的关系可表示为下面的线性关系^[3,4]:

$$\alpha_p = a \alpha_s + b \quad (3)$$

式中 a 、 b 为与太阳天顶角、海拔高度有关的经验系数。本文采用文献[4]提出的方法确定系数 a 、 b 。根据实验区的海拔高度(取 1.5km), 卫星过境时的太阳天顶角(9月3日为 63° ; 9月4日为 68°), 取 $a=0.695$, $b=0.076$ (9月3日)和 $a=0.684$, $b=0.079$ (9月4日)。系数 a 、 b 确定后, 即可利用(3)式从行星反射率 α_p 推算地表反射率。

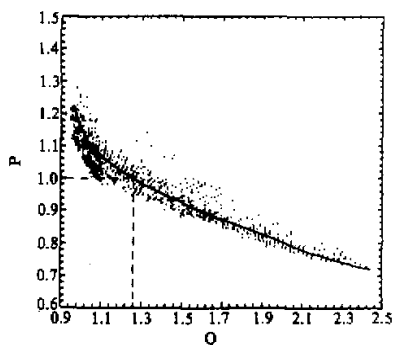


图 2 P 与 Q 的对应关系

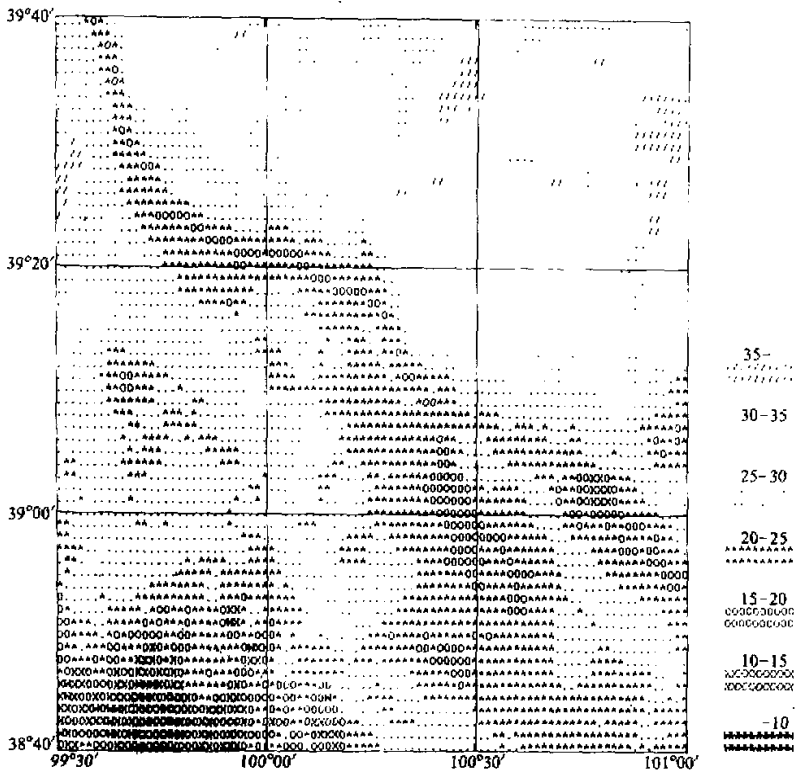
4. 扫描图象位置偏移的几何订正

由于卫星运行轨道的漂移, 根据轨道参数计算出扫描点(象素)所对应的位置与实际位置往往有几公里到十几公里的误差。对于非均匀下垫面, 消除这种位置误差显得十分重要, 否则卫星测量结果将无法与地面测量结果进行比较。考虑到实验区的空间尺度不大, 本文根据实验区内某一有明显特征的目标地的实际位置, 采用平移的办法对整个实验区的扫描图象进行几何订正^[6]。

经过上述处理后, 我们得到了这两天实验区分辨率为 $1' \times 1'$ 的地表反射率分布。由于地表反射率与太阳天顶角有关, 为了便于比较, 并使其有一定代表性, 我们分别对这两天地表反射率的卫星推算值, 作如同文献[4]那样, 按下式

$$\alpha_s(\theta_0) = \alpha_0 + (1 - \alpha_0)e^{-\lambda(90^\circ - \theta_0)} \quad (4)$$

归一化到当太阳天顶角等于实验区(取纬度为 39°)9月份的平均太阳天顶角($\theta_0 = 59^\circ 05'$)时的值。式中 α_0 为当太阳天顶角很小时的地表反射率值, 经验系数 λ 根据文献[4]取 0.14。图 3 为经归一化后两天平均的地表反射率分布图, 它较好地反映了实验区地表反射率的空间分布特征。该图表明, 沿黑河河谷一带, 地表反射率一般为 0.15—0.25。



在其东北大片戈壁、沙漠地区一般为 0.30 — 0.35, 有小块地区可达 0.35 以上。在西南角祁连山区一般小于 0.20, 在很少的一些点上可出现小于 0.10 的值。

在预试验期由于只在张掖(下垫面为甜菜地)和化音(下垫面为戈壁)两站进行了地面观测, 且取得的资料十分有限, 这里只能作一十分粗略的比较。表 2 给出了张掖、化音两站地表反射率的卫星推算值与地面观测值的比较。地面观测值是根据文献[11]给出的该两站的地表反射率的日变化曲线由内插估算得到。进一步的比较, 要求地面观测资料有较好的代表性。

表 2 地表反射率的比较 ($\bar{\theta}_0 = 59^\circ 05'$)

测 站	经 度	纬 度	卫星推算值	地面观测值
张 掖	100°26' E	38°50' N	0.213	0.200
化 音	100°08' E	39°16' N	0.247	0.248

四、植被指数及其与地表反射率的关系

可见光和近红外两个通道反射率值的各种数学组合所表示的植被指数可以很好地用于探测植被状态。其中比值植被指数 ($Q = \alpha_2/\alpha_1$) 与归一化差值植被指数 [$NDVI = (\alpha_2 - \alpha_1)/(\alpha_2 + \alpha_1)$] 为最常用的两种组合形式。由于这两种不同形式的植被指数没有本质上的差别, 本文只分析比值植被指数。

上节已指出观测反射率强烈地依赖于卫星观测角。根据我们对 9 月 3 日与 4 日的资料分析, 植被指数受观测角的影响远小于这两通道观测值本身所受到的影响^[6]。在低植被指数的戈壁、沙漠地区, 两天的差值只有 0.01, 在高植被指数的祁连山区为 0.1。比较两天的结果, 9 月 3 日测得的植被指数要比 9 月 4 日的大一些, 即当观测区处在星下点附近时测得的植被指数要比远离星下点时大一些, 且随着植被指数的增加, 这种特征越明显。这同 Holben 等^[10]对植被指数受观测角影响的理论分析结果相一致。

图 4 为 9 月 3 日与 4 日两天平均的植被指数分布图。该图表明, 河谷地区及祁连山区, 比值植被指数一般大于 1.4, 最高可达 2.2 以上。在戈壁沙漠地区一般小于 1.2, 并有不少地方小于 1.0 (即 $\alpha_2 < \alpha_1$)。NOAA-7 的资料分析也有同样结果。根据地面观测, 即使下垫面是沙漠, 近红外反射率总是大于可见光反射率 (有积雪时除外), 上述结果表明大气层对近红外反射辐射比对可见光有较大的削弱作用。

比较图 3 与图 4, 植被指数与地表反射率有一定的对应关系, 高(低)植被指数对应于低(高)地表反射率。从地表能量收支的角度考虑, 地表反射率是一基本参数。如前所述, 从卫星测量值推算地表反射率需要考虑多种订正。而植被指数的计算比较简单, 由于它是两个反射率的比值 (或两者差与两者和的比值), 所以基本上不受卫星观测角的影响。为了建立地表反射率与植被指数间定量的经验关系, 导出推算地表反射率的一种比较简单、便于实际应用的方法, 我们利用 (4) 式把图 2 所表示的地表反射率归一化到当太阳天顶角很小时的地表反射率 α_0 (这时 α_0 只和下垫面特性有关), 用最小二乘法拟合 α_0 与比值植被指数 Q 的关系, 得到如下形式的经验公式:

$$\alpha_0(Q) = \alpha_1 + (1 - \alpha_1) e^{-k(Q-0.6)}, \quad (5)$$

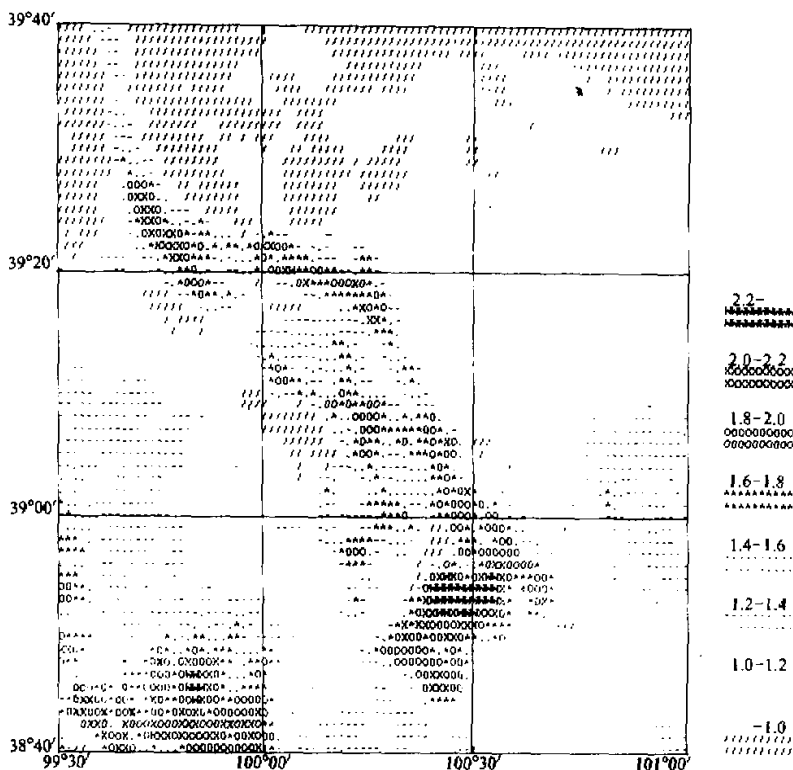
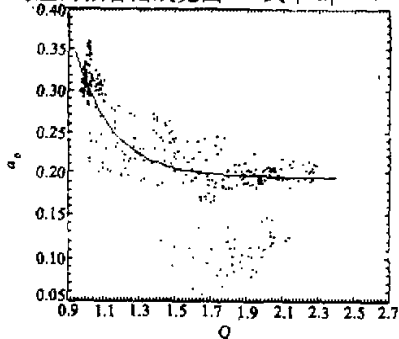


图4 黑河实验区的比值植被指数

对应的拟合曲线见图5。式中 $\alpha_1 = 0.195$ 、为对应于高比值 Q 时的 $\alpha_0(Q)$ 值。 $k = 4.856$

图5 地表反射率 α_0 与比值植被指数 Q 的相关图

为经验系数。(5)式拟合的相关系数为 0.728, 标准差为 0.0364。利用(5)式我们可以根据比值 Q 估算 $\alpha_0(Q)$, 再利用(4)式可得到对应于某一太阳天顶角的地表反射率。我们用这一方法估算了 9 月 3 日与 4 日当太阳天顶角 $\bar{\theta}_0 = 59^\circ 05'$ 时的平均地表反射率(图略), 并与根据第三节的方法得到的结果(图3)进行了比较, 其相关系数亦为 0.728, 标准差为 0.0359。为了分析(5)式的适用性, 从所有的象素中选取代表绿洲、戈壁沙漠、绿洲沙漠边缘地区及祁连山区的 374 个象素为样本(如图5的点所表示), 检验(5)式的拟合程度。结果表明, 若不考虑祁连山区低反射率的象素, (5)式的相关系数可从 0.829 提高到 0.891, 标准差可从 0.0429 降到 0.0259。所以(5)式是适用于地表反射率较高的干旱、半干旱地区估算地表反射率的一种比较简便的方法。

五、结 束 语

黑河实验区下垫面的不均匀性十分明显, 这给卫星资料分析(特别是卫星观测与地面观测的比较)带来一定困难, 但它也有十分有利的一面, 即在一不大的水平空间范围内包含了多种不同下垫面的样本, 这有利于检验资料分析的代表性。根据本文的分析, 为了推算地表反射率, 卫星测量值的各向异性订正^[7]是绝对必要的; 采用以观测实验为依据的不同下垫面宽带与窄带反射率的经验关系^[9], 有利于计算结果的改进; 植被指数对卫星观测角的依赖关系相对较小, 除了低反射率的祁连山区外, 植被指数与地表反射率有较好的对应关系, 并由此可建立根据植被指数推算地表反射率的一种比较简便的方法。

本文根据 NOAA-10 AVHRR 资料得到的黑河实验区的地表反射率与植被指数的空间分布, 由于时间取样十分有限, 其结果有一定局限性。为了很到它们的季节变化, 需要有不同季节的资料。本文建立的方法不难推广到对地表反射率与植被指数的季节变化的分析。

本文在确定大气影响的订正系数时, 根据文献[4]仅考虑为太阳天顶角与地表海拔高度的函数, 在今后的工作中需通过对多种不同大气状态资料的分析, 研究大气状态本身对订正系数的影响。

参 考 文 献

- [1] 魏丽、钟强, 1989, 利用 AVHRR 资料分析黑河地区地表特征, 高原气象, 8, 第 3 期, 189 — 196.
- [2] Brest, C. L. and Rossow, W. B., 1989, Radiometric monitoring and calibration of NOAA AVHRR channel 1 data, *IRS' 88: Current problems in Atmospheric Radiation*, A. DEEPAK Publishing, 245 — 247.
- [3] Chen, T. S. and Ohring, G., 1984, On the relationship between clear — sky planetary and surface albedos, *J. Atmos. Sci.*, 41, 156 — 158.
- [4] Zhong Qiang and Li Yin Hai, 1988, Satellite observation of surface albedo over the Qinghai — Xizang plateau region, *Advances in Atmospheric Science*, 5, 57 — 65.
- [5] Gutman, G., 1988, A simple method for estimating monthly mean albedo of land surface from AVHRR data, *J. Appl. Meteor.*, 27, 973 — 988.
- [6] 吴艾笙, 1990, 黑河实验区 AVHRR 反射率资料的各向异性订正, 高原气象, 9, 第 2 期, 136 — 144.
- [7] Taylor, V. R. and Stowe, L. L., 1984, Atlas of reflectance patterns for uniform earth and cloud surfaces, NOAA Technical Report, NESDIS 10.
- [8] 钟强、吴士杰, 1985, 利用 AVHRR 资料推算青藏高原地区地表反射率的方法, 高原气象, 4, 第 3 期, 193 — 203.
- [9] Wydick, J. E., Davis, P. A. and Gruber, A., 1987, Estimation of broadband planetary albedo from operational narrowband satellite measurements, NOAA Technical Report, NESDIS 27.
- [10] Holben, B. N. and Kimes, D. S., 1986, Directional reflectance response in AVHRR Red and Near — IR bands for three cover types and varying atmospheric conditions, *Remote Sens. Environ.*, 19, 213 — 236.
- [11] 季国良、江源等, 1990, 1988 年 9 月张掖地区太阳辐射状况的初步分析, 高原气象, 9, 第 2 期, 194 — 201.

Surface Albedo and Vegetation Index of Heihe Experimental Area from AVHRR Data

Wu Aisheng Zhong Qiang

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

Abstract

Surface albedo and vegetation index are very important surface parameters relevant to water/heat budget. In this paper, the NOAA-AVHRR data obtained in the pilot experiment period (September, 1988) of the Atmosphere-Land Surface Processes Experiment in Heihe River basin (Heihe) are used for investigating the method of deriving surface albedo from clear-sky planetary albedo. The paper also discusses the spatial distribution characteristics of the surface albedo and vegetation index and the empirical relationship between them for the experimental area.

Key words: Surface albedo; Vegetation index; Heihe River.