

文章编号: 1000-2022(2004) 03-0302-08

宁夏南部区域蒸发(散)量遥感估算方法

郭建茂¹, 王连喜², 郑有飞¹, 李建萍²

(1. 南京气象学院 环境科学系, 江苏 南京 210044; 2. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 宁夏 银川 750002)

摘要: 在利用 LANDSAT-7 ETM+ 卫星遥感资料求取地表特征参数的基础上, 将地表分成 6 类, 结合常规气象观测资料, 分类别计算, 最后综合得出宁夏南部区域蒸发(散)量, 并对结果进行分析验证。

关键词: 蒸发(散); 卫星遥感; 宁夏南部

中图分类号: P426.2 **文献标识码:** A

蒸发(散)发生于土壤—植被—大气系统内, 是一个相当复杂体系内的连续过程, 蒸发(散)既是地面热量平衡的组成部分, 又是水分平衡的组成部分, 而地面热量、水分收支的状况在很大程度上决定着天气、气候的变化, 因此, 对于地表蒸发(散)量的研究多年来一直是国内外气象学、地理学、土壤学、水文学、生态学、植物学等学科关心的焦点问题之一, 特别在最近几年, 随着地表能量交换和物质的迁移研究的深入及水资源合理利用与管理量化的迫切要求, 蒸发(散)问题越来越受到人们的重视。

对于蒸发(散)的计算, 已有大量的传统方法^[1-4]和模拟方法^[5-9], 这些方法都是以点观测资料为基础的。由于下垫面几何结构物理性质的非均匀性, 很难在大面积区域上推广应用。近 20 a 来国内外相继开展利用卫星遥感技术估算区域蒸发(散)量的研究, 并取得了良好效果。

一般利用卫星遥感估算区域蒸发(散)量^[10-11], 所用资料除卫星遥感和常规气象观测资料外, 还需一些特别的气象观测和特定的试验观测资料。本文更多的利用气象规律, 基于前两部分资料, 按下垫面特征分别处理计算得出宁夏南部地区的蒸发(散)量, 同时得到能量平衡的各项值, 并进一步做了分析检验。

1 研究区概况及资料选取

1.1 研究区概况

研究区范围 105°12' ~ 106°58' E, 35°17' ~ 36°34' N, 包括海原以南的宁夏所有区域, 该区域地貌地形复杂, 有六盘山、月亮山、南华山等山体, 有泾河、渭河、清水河等水系, 有六盘山森林草甸区, 有黄土丘陵旱作农业草原区。海拔高度 1 400 ~ 2 950 m, 年平均气温 0.9 ~ 7.0 °C, 年平均降水量 300 ~ 680 mm, 年平均蒸发量 1 200 ~ 1 800 mm(仪器为 20 cm 口径蒸发皿)。

收稿日期: 2003-09-08; 改回日期: 2003-10-23

基金项目: 国家科技部社会公益类研究专项资金项目(2001DIB10089)

作者简介: 郭建茂(1968-), 男, 山西太谷人, 硕士生。

1.2 资料选取

研究资料选取6月底,此时植被生长旺盛,便于区分不同类型植被覆盖,也便于评估其生态效应。本文采用2001年6月30日晴天资料(卫星过境时间为北京时间14时38分),中心经纬度为106°07'E, 36°03'N,数据来源于中国科学院中国遥感卫星地面站。

卫星资料使用了LANDSAT-7 ETM+资料,数据格式为FAST-L7-A,地面分辨率在1~5和7波段为30 m × 30 m,在6L和6H波段为60 m × 60 m,在8波段(PAN—全色波段)为15 m × 15 m;气象资料使用了宁夏南部地区及周边区域22个气象站2001年6月28—30日逐日资料,由宁夏回族自治区气象局和甘肃省气象局提供。宁夏海拔高度图(1:25万)来自于国家测绘总局,像元大小为100 m × 100 m,还有宁夏植被分布图^[12]。

本文所使用的软件是美国ERDAS公司开发的专业遥感图像处理与地理信息系统软件—ERDAS IMAGINE 8.4。

2 资料预处理

2.1 图像处理

首先对卫星遥感图进行几何精校正,校正的误差控制在0.5个像元以内,然后对遥感图进行剪切,保证剪切后的图像所有的通道均为有效值(即没有成片的像元值为零区域),并切去图像上明显有云覆盖区和海原县上空的高云覆盖区,所有图像转化为相同的投影地理坐标,像元大小统一为30 m × 30 m,剪切为同样大小。下面所有的图像亦作同样的处理。

在ERDAS IMAGINE 8.4软件支持下,创建研究区气象台站地理坐标,部分站点经全球定位系统GPS(Global Positioning System)精确定位。

2.2 三维地形表面插值

利用ERDAS IMAGING的3D Surfacing工具,应用气象台站地理坐标,将利用五次多元回归多项式方程,分别对日照时数、水汽压资料进行非线性插值,得到水汽压分布图、日照时数分布图。

对风速作预处理。一般气象站测风值为10 m高度风速,但各站测风高度有所不同,据联合国粮农组织FAO(Food and Agriculture Organization)推荐的方法¹⁾

$$u_2 = u_z \times 4.87 / \ln(67.8z_m - 5.12)。 \quad (1)$$

式中, u_z 为实测风速, u_2 为2 m高度的风速, z_m 为测风高度(m)。利用(1)式也可求得 u_{10} (10 m高度风速)。对 u_2 、 u_{10} 进行三维地形表面插值时,因利用五次多元回归多项式方程进行计算的非线性插值法所得图像出现负值,转而采用按一次多项式方程进行计算的线性插值,得到2 m、10 m高度风速分布图。

2.3 参考作物蒸散、亮温、气温和植被覆盖度

用联合国粮农组织推荐的彭曼—蒙蒂斯方程¹⁾(FAO-PM)计算各站点的参考作物蒸散,并将计算结果在三维地形表面插值(非线性插值);用中国遥感卫星地面站的方法²⁾,计算LANDSAT卫星大气顶部的反射率(1~5、7、8波段)和亮温(6L和6H波段);用刘静等^[13]的

1) 《The WMO/FAO/UNEP Roving Seminar on Application of Climate Data for Effective Planning and Management of Sustainable Irrigational Agriculture》Teaching Materials, 1996, 6, Beijing.

2) 冯钟葵. Landsat 7 ETM+ 数据的增益设置及设置改变. 用户简讯(中国遥感卫星地面站), 2001, 3.

方法计算区域气温。用 Gutman 等^[14]的方法计算区域植被覆盖度。区域植被覆盖度 f 与归一化植被指数 I_{NDV} (Normalized Difference Vegetation Index) 存在以下关系:

$$f = (I_{NDV} - \min(I_{NDV})) / (\max(I_{NDV}) - \min(I_{NDV}))。 \quad (2)$$

本文只在草地—裸地区(有草覆盖但未完全覆盖)计算中涉及覆盖度 f 。经实际对比分析, I_{NDV} 值在 0.005 附近, 地面接近裸地但有少量草被, I_{NDV} 值在 0.40 附近, 草被茂盛地面全被覆盖。因此 I_{NDV} 的最小值取 0.005, I_{NDV} 的最大值取 0.40。

2.4 地表分类

经与大量的实际情况对比验证, 并根据宁夏气象科学研究所现有的地理信息, 将不符的区域剔除后重新归类。

水体: $T_1 - T_5$ 不为 0, $T_1 - T_7$ 不为 0, T_1, T_5, T_7 分别为 1、5、7 波段卫星遥感原始像元值。

依据 I_{NDV} (绿色) 随叶面积的增加而增加的特征, 以 I_{NDV} 区分地面植被覆盖情况并以此分类。 I_{NDV} 用下式计算:

$$I_{NDV} = (r_3 - r_4) / (r_3 + r_4)。 \quad (3)$$

式中, r_3, r_4 为 ETM+ 波段 3、4 的反射率。

$I_{NDV} < 0.005$ 为裸地和水体(水体的 I_{NDV} 为负值), 减去水体区为裸地区。

0.005 $I_{NDV} < 0.40$ 为草地—裸地区(有草覆盖但未完全覆盖)。

0.40 $I_{NDV} < 0.60$ 为草地完全覆盖区。

$I_{NDV} > 0.60$ 为灌丛、乔木林完全覆盖区。

将宁夏海拔高度图转化为像元大小为 1 200 m \times 1 200 m 的图(消除小地形影响)后, 进行坡向分析, 根据阳坡为灌丛、阴坡为乔木林, 区分乔灌区。

2.5 宽带行星反射率

参考祝昌汉等^[15]、马耀明等^[16]的方法选取 LANDSAT-7 ETM+ 资料的 8 波段—全色波段(0.5 ~ 0.9 μm)、7 波段(2.08 ~ 2.35 μm)、5 波段(1.55 ~ 1.75 μm) 计算宽带行星反射率。参照太阳辐照度分布曲线^[17]与太阳辐射各波段的百分比, 得出 8、7、5 波段所占太阳辐射能量的百分比, 并由此计算出这 3 个波段由窄带行星反射率转化为宽带行星反射率的系数, 得到下式, 以其计算得出宽带行星反射率:

$$a^p = r_8 \times 0.8989 + r_5 \times 0.0742 + r_7 \times 0.0270。 \quad (4)$$

式中, a^p 为宽带行星反射率, r_8, r_5, r_7 分别为 ETM+ 图像的 8、5、7 波段的反射率。

从 LANDSAT-7 EMT+ 资料的头文件中获取太阳高度角、方位角、中心经纬度, 根据太阳视角轨道方程计算得出卫星过境时间为北京时间 14 时 38 分, 与 14 时相比反射率及热状况会有所变化。本文利用卫星资料的值有: I_{NDV} 、地面反射率、蒸发面温度(指地面亮温), 在天气情况稳定的晴空条件下, 在此段时间内, I_{NDV} 和地面反射率变化微弱, 而地温变化很小, 卫星资料可以近似作为 14 时资料使用。

3 计算方法

地表热量平衡方程

$$R_n = LE + H + G。 \quad (5)$$

式中, R_n 为净辐射, H 为显热通量, G 为土壤热通量, 它们的单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。 LE 为潜热通量,

E 为蒸发(散)量(mm), L 为潜热蒸发系数($10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)¹⁾。

对于草地—裸地混合区, 引入植被覆盖度 f

$$E = fE_g + (1 - f)E_s \quad (6)$$

式中, E_g 为草地蒸散(mm), E_s 为裸地蒸发(mm)。

以上给出任意时刻瞬时区域蒸发(散)的计算公式。据谢贤群^[18]的研究, 日蒸发(散)量与任一时刻的蒸发(散)量存在正弦关系, 即

$$LE_d / LE = 2N_E / [\pi \sin(\pi / N)] \quad (7)$$

式中, LE_d 为日蒸发(散)量, LE 为 t 时刻蒸发(散)量, t 为卫星接收获取数据的时间, N_E 为日蒸发(散)时数, 取比日照时数少 2 h。对于水体, 因参考作物蒸散与相同天气条件下水面蒸发的比例为 1:1.25^[19], 由参考作物蒸散直接计算得出水体蒸发。

4 参数的求取

4.1 各辐射值

由于没有辐射资料, 本文引用反演的的方法求取。青藏高原海拔较高, 高原大气层厚度和大气中的水汽、气溶胶含量显著减少。宁南地区海拔在 1 400 ~ 2 950 m 之间, 大气清洁, 因此本文参照翁笃鸣等^[19-22]的青藏高原地表辐射场的反演方法。

4.1.1 地表短波吸收辐射

地表短波吸收辐射反演方程^[19]

$$Q(1 - \alpha) = 0.542[1 + 0.413 \ln(1 + H_s)] \times [1 - 0.062 \ln(1 + e)](1 - 0.091n)S_0(1 - \alpha_p) \quad (8)$$

式中, $Q(1 - \alpha)$ 为地表短波吸收辐射, α 为地表反射率, Q 为地表总辐射。方程右边均为已知量, H_s 为海拔高度(km), e 为水汽压(hPa), n 为总云量, 晴空条件下 $n = 0$, S_0 为天文辐射, α_p 为宽带行星反照率。

4.1.2 总辐射

晴天总辐射反演方程^[20]

$$Q = I_0 \sinh / (1 + vm) \quad (9)$$

式中, Q 为晴天总辐射, h 为太阳高度角, $\sinh = 0.948$, m 为大气光学质量, $m = 1 / \sinh$, v 用下式计算

$$v = A + B \ln(1 + e) \quad (10)$$

式中, $A = 0.183p/p_0$, $B = 0.0054 + 0.598p/p_0$, e 为水汽压(hPa), p/p_0 为测点气压与海平面气压之比。

4.1.3 地表长波辐射

地表长波辐射反演方程^[21]

$$U = \delta \sigma [(T_s + 273) + \Delta T]^4 \quad (11)$$

$$\Delta T = 0.823 - 0.062T_s - 0.005T_s^2 \quad (12)$$

式中, U 为地表长波辐射, δ 为地表比辐射率(取 0.95), σ 为 Stefan-Boltzmann 常数

1) 《The WMO\FAO\UNEP Roving Seminar on Application of Climate Data for Effective Planning and Management of Sustainable Irigatal Agriculture》Teaching Materials, 1996, 6, Beijing.

$(5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$, T_s 为地表温度()。方程引入活动面温度,与卫星遥感的亮温相匹配, ΔT 表示地表温度替代活动面温度的误差()。利用此法计算出研究区内 6 站地表长波辐射。

LANDSAT-7 的 6 波段设置了高增益 6H, 低增益 6L 两种情况, 根据 Stefan-Boltzmann 定律, 分别求得对应像元大气层顶向上的长波辐射。

将地表长波辐射与两种情况(6H、6L)的大气层顶向上的长波辐射进行拟合, 选中拟合较好的 6H, 得出拟合结果如下式

$$U = 1.849\ 930L_{\text{TOA}} - 391.024\ 956. \quad (13)$$

式中, U 为拟合得出的长波辐射, L_{TOA} 为大气层顶向上的长波辐射, 方程相关系数 $R = 0.95$, 统计量 $F = 37.875\ 46$, 显著性水平为 0.01 的 F 置信限 $F_{\alpha} = 21.2$, $F > F_{\alpha}$, 拟合效果很好。利用此法计算出地表长波辐射区域分布。

根据地表长波辐射方程

$$U = \delta\sigma(T_0 + 273)^4. \quad (14)$$

式中, U 由(13)式得出, 可以求得 T_0 (), T_0 为活动面温度亦即蒸发(散)面温度。

4.1.4 大气逆辐射

大气逆辐射反演方程^[22]

$$L_{\text{AB}} = \delta\sigma(T_{\text{A}} + 273)^4 [0.560 + 0.094\ln(1 + e)] (1 + 0.142n^2). \quad (15)$$

式中, L_{AB} 为大气逆辐射, 右边各项如上所述。

至此可得出地表净辐射 R_n

$$R_n = Q(1 - \alpha) + L_{\text{AB}} - U. \quad (16)$$

式中, $Q(1 - \alpha)$ 为地表短波吸收辐射, L_{AB} 为大气逆辐射, U 为地表长波辐射。

4.2 土壤热通量

据马耀明等^[10]的研究, 土壤热通量 G 可用下式表达

$$G = T_0/\alpha \times (0.003\ 2\alpha - \alpha^2)(1 - 0.978I_{\text{NDV}}^4)R_n. \quad (17)$$

式中, α 为地面反射率: $\alpha = 1 - Q(1 - \alpha)/Q$, $Q(1 - \alpha)$ 为地表短波吸收辐射, Q 为晴天总辐射。

4.3 显热通量

显热通量方程

$$H = \rho c_p (T_0 - T_a) / (r_{ac} + r_{bh}). \quad (18)$$

式中, ρ 为空气密度, c_p 为空气比热容($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T_0 为蒸发(散)面温度(K), T_a 为空气温度(K), r_{ac} 为修正的空气动力阻力($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$), r_{bh} 为剩余阻力($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)。 r_{ac} 和 r_{bh} 由以下方法计算^[18]

$$r_{ac} = r_a \{1 + \Phi_H / \ln[(z - d)/z_0]\}, \quad (19)$$

$$u^* = uK / \ln[(z - d)/z_0], \quad (20)$$

$$r_{bh} = 4/u^*. \quad (21)$$

其中, r_a 为中性条件下的空气动力阻力($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$), Φ_H 为热量的层结稳定度函数, z 为地面以上参考高度(m), d 为零平面位移(m), z_0 为粗糙度长度(m), u^* 为植冠的摩擦速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

$$r_a = \ln^2[(z - d)/z_0] / [K^2 u]. \quad (22)$$

$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_H = [1 - 16(z - d)/L_M]^{-1/2}, (z - d)/L_M < -0.03 \text{ (不稳定);} \\ \Phi_H = 1 + n(z - d)/L_M, (z - d)/L_M > 0 \text{ 和 } -0.03 < (z - d)/L_M < 0 \text{ (微弱不稳定).} \end{array} \right.$

L_M 为莫宁—奥布霍夫特征长度

$$L_M = u^* T_m / [K g (T_a - T_0) / u] \quad (23)$$

式中, K 为 Von Karman 常数(取 0.4), g 为重力加速度, u 为 z 处的风速($m \cdot s^{-1}$), $n=5$, $T_m = 1/2 \times (T_0 + T_a)$ 。

对于裸地没有剩余阻力项, 粗糙度长度 z_0 取 0.01 m, 零平面位移 d 为 0, 参考高度 2 m, u 取 2 m 高度风速。对于草地、灌丛、乔木, 零平面位移 $d = 0.67h$, 粗糙度长度 $z_0 = 0.13h$, h 为植物高度(m)。草地、灌丛取其高度分别为 0.2 m、0.8 m, 参考高度 2 m, u 取 2 m 高度风速; 对于乔木取其高度 8 m, 参考高度 10 m, u 取 10 m 高度风速。

5 结果与验证

由宁南地区蒸发(散)分布(图 1)显示: 日蒸发(散)量基本上呈正态分布, 其范围为 1.0 ~ 7.5 mm, 其峰值在 4.24 mm 附近, 平均值为 3.70 mm, 标准差为 1.71。

图 2 左上角坐标为 105°12'17"E, 36°33'45"N, 右下角坐标为 107°26'30"E, 35°05'27"N, 日蒸发(散)量高值区为较亮区, 日蒸发(散)量低值区为较暗区。由图 2 可以看出: (1) 日蒸发(散)量高值区为水体和六盘山区的灌丛和乔木林区, 日蒸发(散)量低值区分布在彭阳一带的显热通量较大的裸地区。(2) 水体区日蒸发明显大于周围的其它地表类型日蒸发(散)。(3) 经与宁夏植被图和 I_{NDV} 图比较, 有植被覆盖区明显大于周围无植被区和少植区。以上情况基本符合实际。

由于研究区内没有大型蒸散仪等观测资料, 本文采用 FAO¹⁾ 推荐的被广泛使用计算日蒸发(散)的 PM 公式的计算结果来进行比较, PM 公式计算出的蒸散量是在水分供应充足情况下得出的可能蒸散量, 应用时乘以作物系数 K_c 。在本研究区, 6月28日普降 20mm 降水, 可以认为 29 日水分充足, 30 日水份基本满足(29、30 日为晴好天气)。参照 FAO¹⁾ 和裴步祥^[9] K_c 的取值方法, 综合站点的 I_{NDV} 值, 隆德、固原、西吉站归为裸地区, K_c 系数取 0.8, 泾源站归为草地区, K_c 系数取 0.9, 比较结果见表 1。

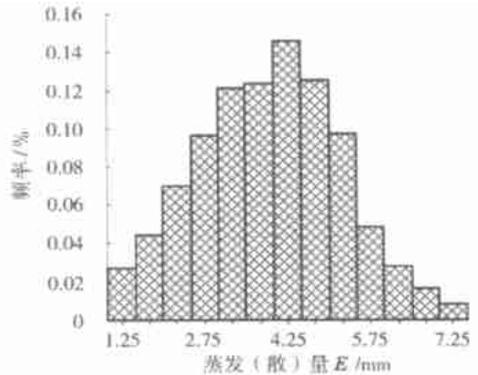


图 1 宁南地区蒸发(散)分布直方图

Fig. 1 Distribution of daily evapotranspiration over south Ningxia

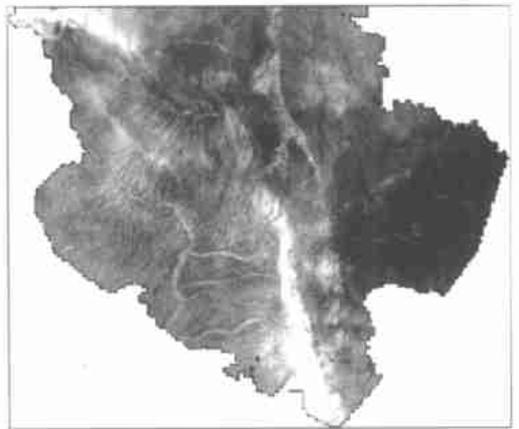


图 2 宁夏南部地区日蒸发(散)计算结果

Fig. 2 Calculated results of daily evapotranspiration over south Ningxia

1) 《The WMO/FAO/UNEP Roving Seminar on Application of Climate Data for Effective Planning and Management of Sustainable Irrigational Agriculture》Teaching Materials, 1996, 6, Beijing.

由表 1 可见, 最大偏差 17.6, 最小偏差 6.1, 平均偏差 13.4, 最大偏差、平均偏差都不大。表 1 中将遥感估算与 FAO 方法值对比, 但由于 FAO 方法本身有一定误差, 故只能说明遥感估算有一定的可用性, 要提高精度需要增加测点, 进一步的检验需要实测的蒸发(散)值。

彭阳和六盘山站未列入比较, 由于两站 14 时风速值与 FAO-PM 公式中利用的风速值(日平均)相差甚大, 因而两站计算的结果与 FAO-PM 公式计算的结果, 可比性较差。

表 1 遥感估算区域蒸发(散)与 FAO 方法值对比

Table 1 Comparison of FAO's evapotranspiration with the estimation of remote sensing model

站名	植被覆盖状况	遥感估算日 蒸发(散)量/mm	FAO 方法日 蒸发(散)量/mm	相对偏差
隆德	裸地	5.82	4.95	17.6
固原	裸地	4.75	5.62	-15.5
西吉	裸地	4.38	5.21	-14.5
泾源	草全覆盖	5.82	6.20	-6.1

6 结论与讨论

引入反演的办法, 求取辐射各平衡量和地表反射率, 突破了以往方法需试验观测的局限, 而且对比验证精度较好, 因而具有较好的实用性。将地表分为水体和 5 种覆盖类型不同的情况, 使用不同的方法与参数, 提高了准确性。在计算过程中得出辐射平衡各分量和能量平衡各分量, 利于与其他研究融合。

能量平衡方程和由瞬时蒸发(散)量推算全天蒸发(散)量的方程, 均是在没有平流的情况下推导出来的, 当有平流发生时, 会产生较大误差。另外, 反演的办法和气象资料的尺度转换也会产生一些误差, 误差的分析和如何降低误差有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Monteith J L. Environmental Control of Plant Growth[M]. New York: Academi Press, 1963: 95-112.
- [2] Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere[M]. New York: Springer Verlag, 1975.
- [3] Hillel D. Applications of Soil Physics[M]. New York: Academic Press, 1980.
- [4] Bowen I. The ratio of heat losses by conduction and evaporation from any water surface[J]. Phys Rev, 1926, 27: 779-798.
- [5] Dickinson R E. Changes in Land Use Climate System Modeling[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993: 689-701.
- [6] Selles A H, Pitman J A. Land-surface schemes for future climate modes: specification, aggregation and heterogeneity[J]. J geophys Res, 1992, 97(D3): 2 787-2 696.
- [7] 谢贤群, 左大康, 唐登银. 农田蒸发—测定与计算[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [8] 程维新, 胡朝炳, 张兴权. 农田蒸发与作物耗水量研究[M]. 北京: 气象出版社, 1994.
- [9] 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与计算[M]. 北京: 气象出版社, 1989.
- [10] 马耀明, 王介民. 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): 180-188.
- [11] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 中国西北地区蒸发散量计算的遥感研究[J]. 地理学报, 2001, 56(3): 261-268.
- [12] 宁夏农业勘查设计院, 宁夏畜牧局, 宁夏农学院. 宁夏植被[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 1988.
- [13] 刘 静, 马力文, 周惠琴, 等. 宁夏扬黄灌区热量资源的网格点推算[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(3): 64-71.

- [14] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. *Int J Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1 533-1 543.
- [15] 祝昌汉, 朱福康, 刘玉洁. 青藏高原晴空行星反照率与地表反照率的研究[J]. *科学通报*, 1990, 35(20): 1 563-1 565.
- [16] 马耀明, 王介民. 黑河实验区地表净辐射区域分布及季节变化[J]. *大气科学*, 1997, 21(6): 743-749.
- [17] 梅安新, 彭望琮, 秦其明, 等. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [18] 谢贤群. 遥感瞬时作物表面温度估算农田全天蒸散总量[J]. *环境遥感*, 1991, 6(4): 253-259.
- [19] 高歌, 翁笃鸣. 利用ERBE和ISCCP资料反演青藏高原地表短波吸收辐射场[J]. *南京气象学院学报*, 1998, 21(1): 8-14.
- [20] 翁笃鸣, 高庆先, 刘艳. 应用ISCCP云资料反演青藏高原地面总辐射场[J]. *南京气象学院学报*, 1997, 20(1): 41-46.
- [21] 高歌, 张兰英, 翁笃鸣. 青藏高原地表长波辐射参数化及其气候计算[J]. *南京气象学院学报*, 1997, 20(3): 318-325.
- [22] 翁笃鸣, 高歌. 利用卫星资料试作青藏高原地表净辐射场的气候反演[J]. *气象科学*, 2001, 21(2): 162-168.

Estimating Method of Regional Evapotranspiration over South Ningxia Using Satellite Remote Sensing Data

GUO Jian-mao¹, WANG Lian-xi²,
ZHENG You-fei¹, LI Jian-ping²

(1. Department of Environmental Sciences, NIM, Nanjing 210044, China;

2. Key Laboratory of Meteorological Disaster Preventing and Mitigation of Ningxia, Yinchuan 750002, China)

Abstract: It is a very complicated problem to estimate evapotranspiration (ET) over a large area natural surface. Based on the information of satellite remote sensing and geography, the natural surface is divided into 6 categories, and then the evapotranspiration for each category is calculated. By analyzing the satellite remote sensing and weather station data, the result of regional evapotranspiration over south Ningxia is given, and the result is also analyzed and verified.

Key words: evapotranspiration; remote sensing; south Ningxia