

# 一种可操作的区域尺度地表通量 定量遥感二层模型的物理基础\*

张仁华\*\* 孙晓敏 王伟民 许金萍 朱治林 田静

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要** 以修正的二层模型耦合机制, 提出了 PCACA 算法以及理论定位算法, 结合干点和湿点定标场的参数测定值, 推算到 4 个极端的混合像元真实温度, 提高了干线和湿线的定位的可靠性, 并且提出了二层层能量切割算法, 算法简捷明了, 具有物理基础, 摆脱了难以逐个像元获取的通量阻力网参数. 对平流的影响提出了新的思考. 又以 PCACA 算法分解了混合像元的反照率, 联合二层层能量切割算法, 分解了混合像元的净辐射通量, 克服了传统以 Beer 定律分解净辐射通量的不确定性. 通过反演结果的验证分析, 方法是可行的也是易于操作的. 在论述上述算法可操作性的同时也客观地指出了不确定性.

**关键词** 区域尺度地表通量遥感二层模型 像元组分排序对比算法 分层能量切割算法

众所周知, 目前探测地表通量及其有关参数的方法绝大多数还局限在单点测量上. 对于非均匀的下垫面所获取的数据, 不能很好地反映空间分布的真实规律. 因此, 凡涉及到区域性和全球性的地学属性观测数据, 经常出现非常离散的现象, 因而所得结论有分歧. 区域和全球尺度的地表通量也不例外. 其中主要原因之一就是绝大多数的数据是以点代面的, 数据缺乏区域代表性和空间分布的真实性. 实际上, 区域地表通量规律性的研究均需要区域上连续二维的数据, 才能更逼真反映客观世界, 才能更正确地揭示规律.

由此可见, 实际“点”测量地表参数的能力和现实世界的需求存在矛盾, 这种供需矛盾是一种严峻的挑战.

运用遥感数据推算区域地表通量的方法已经越来越受到人们的重视. 特别是定量热红外遥感技术的发展, 引起了气象水文领域科学家的浓厚兴趣. 一些定量遥感科学家对地表温度更为关注. 因为地表辐射温度所包含的信息是地表(界面)热量平衡、水量平衡的综合结果. 所以遥感手段所获得的表面辐射温度也蕴涵热量平衡、水量平衡的信息. 关键在于信息的分解和挖掘. 近二十多年, 发展了多种遥感模型

2004-11-01 收稿, 2004-11-12 收修改稿

\* 中国科学院知识创新工程重大项目(编号: KZCX1-SW-01-01A)、国家重点基础研究发展规划项目(编号: 2002CB412501, 2000077900)、国家自然科学基金项目(批准号: 40371089, 49890330)和中国科学院知识创新工程项目(编号: CXIOG-E01-04-04, 2000077900)共同资助

\*\* E-mail: Zhangrh@igsrr.ac.cn

和方法来确定地表通量的二维分布<sup>[1-7]</sup>。概括地分析其目前的发展：为湿润植被覆盖茂密地区发展的一层模型，如 SEBAL<sup>[8]</sup>，以及改进 SEBAL 模型的 SEBS 模型等<sup>[9]</sup>。这些模型的特点是把土壤和植被的混合像元作为一张大叶子处理。模型需要在遥感图象中选择干点和湿点，运用空气和地表温度的实验方程，消去难以获取的空气温度参数，适合植被茂密的地区应用。在半湿润、植被不太茂密或半干旱、植被稀疏地区，将土壤和植被分开考虑，显然更合理。Deardorff<sup>[10]</sup>，Dickson<sup>[11]</sup>，Suttleworth<sup>[12]</sup>等提出土壤和植被分开的阻力网概念后，Choudrury 和 Monteith<sup>[13]</sup>，Choudrury<sup>[14]</sup>扩展了以系统阻力网为基础的二层模型。虽然建立了 6 个方程 6 个未知数的闭合方程组，但是解方程的参数和过程还局限在农业气象的田间尺度上。Norman 发展了平行二层模型(N95)<sup>[15]</sup>，提出了利用多角度热红外遥感分解混合像元辐射温度的关键步骤。他们仍采用 Beer 定律进行净辐射的分解。其实质是对二层模型的阻力网概念作了一定的简化。N95 模型利用遥感数据和地面数据的结合，促使二层模型在区域尺度上应用迈进了一步。而后，Kustas 等对平行二层模型作出了若干改进：在概念上阐明了这种平行模型既不同于系统模型也不同于补丁或斑块模型；对运用 Beer 定律进行净辐射的分解的不确定性进行了分析<sup>[16-20]</sup>。然而，他们对运用多角度遥感进行混合像元辐射温度的分解方法及其不确定性均没有进行详细的论述。

欧洲空间局发射的 ATSR 卫星，专门设计了以前视 53° 和垂直向下两个观测角度获取热红外影象图的装置。为分解土壤表面和植被冠层温度开辟了新路<sup>[20]</sup>。这种方法的不确定性是垂直向下的角度观测到的地面面积(为 1.06 km×1.06 km)与 53° 角度(为 2 km×1.5 km)，其大小与形状不一样，也就是说观测到的不完全是同一块地物。使用者往往要采取重新采样的方法。由于以垂直方向的数个像元合并成(重采样)的一个像元与倾斜方向的数个像元合并成的一个像元相匹配时，两个面积仍有一定的差异，从而带来一定的误差。重新采样的方法将降低数据的空间分辨率。另外，目前广为使用的卫星数据源 NOAA-AVHRR，MODIS 等均没有多角度数据，限制了这种方法的广

泛应用。

另一种混合像元温度分解途径是我们提出的利用早、中午两个时相的热象图获取热惯量信息，建立另一个方程，和覆盖率、温度的加权方程进行联立求得  $T_v$ ， $T_s$ <sup>[22,23]</sup>。这种方法的优点是开拓和挖掘了热红外多时相信息的潜力，为利用 NOAA-AVHRR，MODIS 卫星数据源分解地表温度提出一种新思路。不足之处是要用实验方法确定局地热惯量和风速影响因子的系数。本文在我们的原来模型和方法基础上，提出并论述一种新的可操作的二层模型及其理论依据。其中包括 PCACA 算法以及理论定位算法，二层分层能量切割算法。并讨论以 PCACA 算法分解混合像元的反照率以及联合二层分层能量切割算法，分解混合像元的净辐射通量的物理基础。重点论述混合像元的土壤和冠层的净辐射、辐射温度分解的原理及方法。在论述可操作性的同时也将客观地指出其不确定性。论文并以 MODIS 数据以及东平湖同步观测数据对上述方法和算法进行了验证。阐述在 ENVI 系统下二层模型的地表通量反演过程：包括 MODIS 数据接收、消云、多波段配准处理、大气辐射校正、地表温度和净辐射通量的分解过程和地表通量的反演步骤，东平湖同步观测定标以及与卫星像元尺度的转换、禹城试验站的数据验证等过程。

## 1 混合像元组分分解算法的建立

### 1.1 混合像元组分排序对比法(PCACA)的物理基础及温度分解

Carlson 在定量求解地表过程方程组中，因有许多未知数而难以求解。因此，在应用需求的驱动下提出利用 NDVI 植被指数与像元辐射温度之间的信息联系，对地表的湿润状况进行简化分析，得到了一种直截了当而且简洁的分析方法。由于方法简单，在一定条件下，很有应用价值<sup>[24]</sup>。

1989 年 Moran 在美国 Arizona 州水保所，在不同覆盖率并具有不同受胁状态的 18 块苜蓿地上开展了野外试验，试验时段长达 90 d 以上，为苜蓿的整个生长期。结果表明，所有不同覆盖率的地表温度均在“植被指数-地表温度”所构成的梯形框架中，利用梯形的干边和湿边之间的线性内插线，定量估算苜蓿

的缺水状况<sup>[25,26]</sup>.

上述学术动态表明, 植被指数与地表温度之间的融合, 将会揭示丰富的信息. 下述将利用这种信息推导混合像元温度分解的算法.

混合像元的温度与覆盖率的关系有如下表达式:

$$\sigma \varepsilon_m T_m^4 = \sigma \varepsilon_v f T_v^4 + \sigma \varepsilon_s (1-f) T_s^4, \quad (1)$$

其中  $T_m$ ,  $T_v$ ,  $T_s$  分别为混合像元、植被冠层和土壤表面温度.  $\varepsilon_m$ ,  $\varepsilon_v$ ,  $\varepsilon_s$  分别为混合像元、植被和土壤表面的比辐射率,  $\sigma$  为斯蒂芬-波尔兹曼常数,  $f$  为混合像元的覆盖率.

方程(1)中的  $T_m$ ,  $f$ ,  $\varepsilon_v$ ,  $\varepsilon_s$  均可通过一定方法获取. 事实上是一个方程有两个未知数, 必须增加一个方程才能求解. 已经有的一种思路是利用两个角度获取两个方程:

$$\sigma \varepsilon_m T_{m1}^4 = \sigma \varepsilon_v f_1 T_v^4 + \sigma \varepsilon_s (1-f_1) T_s^4, \quad (2)$$

$$\sigma \varepsilon_m T_{m2}^4 = \sigma \varepsilon_v f_2 T_v^4 + \sigma \varepsilon_s (1-f_2) T_s^4, \quad (3)$$

其中下标 1, 2 分别为两个不同角度. 两个方程可以求解  $T_v$ ,  $T_s$ . 但是两个角度观测到的  $T_v$ ,  $T_s$  必须分别相同. 在方程(1)中可以看到, 混合像元温度  $T_m$  是植被冠层表面温度  $T_v$ 、土壤表面温度  $T_s$  以及覆盖率  $f$  的函数. 方程(1)在覆盖率处的导函数, 为:

$$4\varepsilon_m T_m^3 \frac{dT_m}{df} + T_m^4 \frac{d\varepsilon_m}{df} = \varepsilon_v T_v^4 - \varepsilon_s T_s^4, \quad (4)$$

(4)式等号两边同乘以  $f$ , 构成另一个方程, 即:

$$f \left( 4\varepsilon_m T_m^3 \frac{dT_m}{df} + T_m^4 \frac{d\varepsilon_m}{df} \right) = f \varepsilon_v T_v^4 - f \varepsilon_s T_s^4. \quad (5)$$

(1)式与(5)式解得  $T_s$

$$T_s = \left\{ \frac{1}{\varepsilon_s} \left[ \varepsilon_m T_m^4 - f \left( T_m^4 \frac{d\varepsilon_m}{df} + 4\varepsilon_m T_m^3 \frac{dT_m}{df} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{4}}, \quad (6)$$

(4)式与(1)式解得  $T_v$

$$T_v = \left\{ \frac{1}{\varepsilon_v} \left[ \varepsilon_m T_m^4 + (1-f) \left( T_m^4 \frac{d\varepsilon_m}{df} + 4\varepsilon_m T_m^3 \frac{dT_m}{df} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{4}}, \quad (7)$$

其中  $\varepsilon_v$ , 可以应用平均值近似取代, 误差不会太大.

$f$  可以实际测定.  $\varepsilon_m$  可以应用加权方程求得.  $\frac{d\varepsilon_m}{df}$

可以应用模拟计算, 不失其严谨. 只要求得  $\frac{dT_m}{df}$ , 分

解混合像元温度的问题就迎刃而解. 对上述的推导也可以进行简化. 可近似认为:

$$T_m^4 \frac{d\varepsilon_m}{df} \approx 0, \quad \varepsilon_v \approx \varepsilon_s \approx \varepsilon_m. \quad (8)$$

上述推导中假设  $\frac{dT_v}{df}$ ,  $\frac{dT_s}{df}$  近似等于 0, 而事实上

上这两个导数在像元尺度上不等于 0. 因为在覆盖率密集的地方, 一般湿度大, 而且植被冠层的表面温度要低些, 假设  $2 \frac{dT_v}{df} \approx \frac{dT_m}{df}$  以及  $2 \frac{dT_s}{df} \approx \frac{dT_m}{df}$ , 得到简

化表达式:

$$2 \frac{dT_m}{df} \approx (T_v - T_s). \quad (9)$$

由上述推导过程表明, 无论是  $T_m^4$  方程的完全表达式还是  $T_m$  近似简化表达式, 均可以使方程组闭合求出  $T_v$ ,  $T_s$ . 每个像元根据其  $T_s - T_v$  值、 $T_m$  值和  $f$  值, 将在梯形区内对号入座. 也可能多个像元点重复叠加(图 1). 当某一个像元的覆盖率确定后, 构成这个混合像元温度的数值可以由无穷个  $T_v$  和  $T_s$  的组合. 由于在梯形区里同一条斜率线上混合像元的土壤水分可利用率相等. 在此前提下, 不仅同一条斜率线上

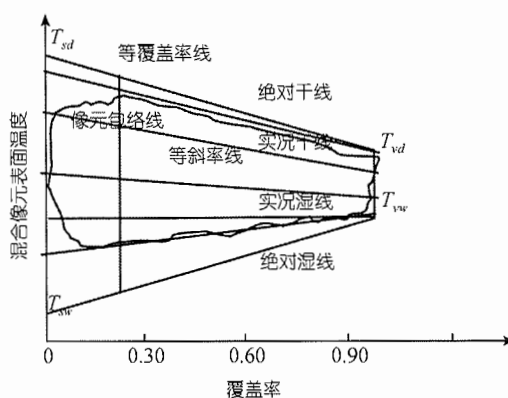


图 1 像元排序对比算法(PCACA)的梯形结构以及各种线和点的理论定位

的  $T_s - T_v$  的差值相等, 而且  $T_s$  相等以及  $T_v$  也相等. 而变化的仅仅是覆盖率. 我们的目标是分解表面温度为  $T_s$ ,  $T_v$ , 为此首先对所有像元点的混合辐射温度-覆盖率相关点的分布状况做如下的判断, 并从理论上分析其合理性.

上述方法实质上是通过像元的排序, 模拟了  $T_m$  随  $f$  的变化关系, 即  $dT_m/df$  的变化过程. 并且以解析几何方法求解, 与多角度测定的方法的原理是相同的. 利用多角度方法的原理是力求在相同的土壤表面温度和冠层表面温度的前提下, 以不同角度的观测值寻找到了两个不同覆盖率, 形成两个不同的混合像元或混合视场的辐射温度. 而利用像元排序的方法, 在温度与覆盖率的相关图上也存在相同的土壤表面温度和冠层表面温度的等值线, 在这条线上的各个像元的显热通量和潜热通量也应该近似相同. 由于覆盖率的差异而造成混合像元的辐射温度不同. 因此沿着这条等值线, 不同像元的覆盖率差异, 就等于不同角度所造成的覆盖率的差异. 而且, 从某种角度讲, 像元排序方法还克服了多角度方法中由于垂直倾斜两个角度所观测到的不同面积的不确定性. 我们称这种方法为像元组分排序对比法, PCACA(Pixel component arranging and comparing algorithm).

当有如下的假设条件: 土壤和植被冠层的耦合机制符合我们以前提出的二层模型<sup>[22]</sup>, 而不是补丁或斑块(patch)二层模型. 并且在物理概念上作出了如下修正: 单株植被下的土壤与贴近的土壤构成了二层模型的最小单元. 两者的辐射源(热源)和驱动力可以不一样. 土壤表面温度可以与植被冠层温度不一样, 而由于植被根系的扩展和土壤水分的侧渗作用, 在这最小单元内土壤层(有根系的)和植被根系层的水分状况应该属于同一源. 当以这种最小单元占优势或绝对优势, 并积分到像元尺度时, 其积分效应也应该体现出裸土壤和贴近的植被下土壤的水分, 属于同一源(图 2). 这种假设被 Moran 的研究试验成果证实. Carlson 的研究成果也基本确认这种假设的合理性<sup>[26,27]</sup>. 因此, 干线和湿线之间存在逐渐过渡的等土壤湿度线. 它应该与等斜率线一致.

这种假设的不确定性来自像补丁或斑块二层平行模型的机制, 在同一像元里有面积相当的成块土壤和非常密集的植被, 两者有截然不同的土壤水分状况.

## 1.2 干线和湿线的理论定位和获取方法

根据上节分析, 分解混合像元地表温度的关键是如何求得  $dT_m/df$ . 在获取  $dT_m/df$  方法的实践过程中, 如果在理想区域内, 极端干、湿和各种覆盖率的像元都存在, 各个像元的坐标位置可以排列成非常规律的直线, 各种斜率的直线构成了非常整齐的梯形. 如果不具备所有条件的像元点, 特别是不存在绝对的干点和湿点, 就会在这个干线与湿线包括的区域内存在空缺的散点, 甚至空缺区. 因而, 像元散点的梯形包络线出现偏离干线和湿线, 并出现凹凸现象, 也就是在梯形图中缺少了一部分  $T_m$  和  $f$  的组合组分. 最终导致干线、湿线及其关键参数斜率  $dT_m/df$  的求解存在一定的不确定性.

对于梯形图中每个组分  $T_m$  而言, 实质上是受到热量平衡方程控制的. 当太阳辐射、风速在相当范围内差异不明显的前提下. 在局地性明显的主参数  $T_m$ ,  $f$  和  $W$ (湿润指数)中, 除混合像元辐射温度  $T_m$  和覆盖率最为重要外, 还有湿润指数  $W$  是主要的. 地表热量平衡方程为:

$$R_n - G = H + LE, \quad (10)$$

如果运用土壤热通量与净辐射通量的简化关系,  $G \approx 0.3(1-0.9f)R_n$ , 则

$$R_n[1-0.3(1-0.9f)] = H + LE, \quad (11)$$

当土壤相当干燥时, 也就是进入一种极端状况, 已经没有土壤水分蒸发, 没有作物蒸腾, 土壤水分接近凋萎系数, 热量平衡方程成为

$$R_n[1-0.3(1-0.9f)] = H, \quad (12)$$

对于干裸地,  $f = 0$ , 其热量平衡方程有如下表达式:

$$0.7 \left[ S_0(1-\alpha_{SD}) + \sigma \varepsilon T_{sky}^4 - \sigma \varepsilon_{SD} T_{SD}^4 \right] = \frac{\rho C_p (T_{SD} - T_a)}{r_{SDa}}, \quad (13)$$

将  $T_s$  提到方程左边, 得到一元四次方程,

从理论上分析, 此时的植被处与充分湿润状态. 对于湿植被地的  $r_{vwa}$ , 在一定代表性的粗糙度表面下, 空气动力学阻力主要取决于风速植被高度. 风速也可通过县一级气象站网风速区域分布数据获取局地湿植被地的风速. 植被高度可以根据区域平均状况确定. 在卫星过境时刻的稳定度下, 湿植被地的代表性的  $r_{vwa}$  可以通过计算获取.

最后, 梯形的湿植被地的坐标从理论上得到定位(见图 1). 一旦 4 个极端地表温度值确定后, 干线和湿线中的坐标位置就确定. PCACA 方法的不确定性可以基本上得到改善. 从 Moran 类似的研究成果中也可证实上述的研究途径的可行性<sup>[25,26]</sup>. 在此应该说明, 这 4 个计算值仍需要空气阻力等参数. 但是这种算法已经将需要所有像元的空气阻力数据压缩到 4 个点, 这 4 个点的的数据可以通过定标场的观测获取. 因此从不可操作发展到可以操作, 应该说跨越了一大步.

梯形的框架确定后, 干线与湿线上所有像元的  $dT_m/df$  可以通过斜率的计算获取.

### 1.3 以 PCACA 分解混合像元反照率

以遥感方法获取净辐射通量后, 许多二层模型利用 Beer 定律, 将其分解成土壤和植被冠层的净辐射通量. 通过进一步的实践, 这种思路存在较大的不确定性. Beer 定律是定量描述辐射通过介质的衰减情况的, 当辐射通过植被层时, 表达衰减情况是以植被几何结构及叶面积指数为参数的负指数函数. 某土壤和植被的混合像元(或单位面积)的平均净辐射通量获取后, 运用 Beer 定律分解, 实质上是通过叶面积指数和叶角等参数确定的孔隙与非孔隙的比例, 将平均净辐射通量分配给土壤和植被表面. 如果土壤和植被的反照率和辐射温度相近, 误差不大. 反之, 相差较大, 就会造成较大的误差和不确定性. 事实上, 土壤的反照率和辐射温度的差异有时可以非常大. 特别是土壤表面温度可以大于植被冠层表面温度 10 °C 以上. 由此可见, 将土壤和植被分开求出各自的净辐射通量, 显然更为合理.

净辐射通量由可见光、近红外波段的短波净辐射和热红外波段的长波净辐射组合. 因此得到净辐射

通量, 除了将混合像元进行辐射温度分解外, 还必须对混合像元的反照率进行分解. 土壤反照率取决于土壤湿度、土壤类型和粗糙度等, 变化幅度较大. 植被的反照率取决于叶色、冠层结构等, 变化幅度较小. 由于获取反照率的目的是计算净辐射通量, 因此只需考虑各种影响因子的综合积分效果(包括各种因子在可见光到近红外的光谱积分效果). 混合像元的反照率将服从于土壤和植被的这种综合效果的加权平均. 其反照率-覆盖率散点图的包络线呈现梯形, 比温度-覆盖率散点图的形状规范. 因此同样可运用 PCACA 方法进行混合像元反照率的分解. 首先建立混合像元的反照率-覆盖率方程

$$\alpha_m = (1-f)\alpha_s + f\alpha_v, \quad (22)$$

以  $f$  对  $\alpha_m = (1-f)\alpha_s + f\alpha_v$  进行求导后, 获得新方程有:

$$\frac{d\alpha_m}{df} = \alpha_v - \alpha_s, \quad (23)$$

联立(22), (23)两式, 可获得  $\alpha_s$  和  $\alpha_v$  的解:

$$\alpha_s = \alpha_m - f \frac{d\alpha_m}{df}, \quad (24)$$

$$\alpha_v = \alpha_m + (1-f) \frac{d\alpha_m}{df}, \quad (25)$$

其中  $\alpha_s$ ,  $\alpha_v$  和  $\alpha_m$  分别为土壤、植被和混合像元的平均反照率. 表达式(24), (25)可以算出每个像元的  $\alpha_s$ ,  $\alpha_v$ . 不难知道,  $\alpha_s$  和  $\alpha_v$  取决于混合像元的反照率和反照率随覆盖率的导数. 前者是已知数, 因此问题的焦点就是如何求得反照率随覆盖率的导数. 与上述分解辐射温度一样, 导数在 PCACA 方法中表现为斜率. 反照率随覆盖率的斜率(导数)可以通过 PCACA 方法获取. 在此应该注意, 土壤辐射温度基本大于植被冠层表面温度, 因此, 混合像元辐射温度随覆盖率的斜率一般是负数. 而混合像元反照率由于土壤水分的影响, 其斜率可正可负. 当  $\alpha_s > \alpha_v$  (全波段平均而言)其斜率为负数. 当  $\alpha_v > \alpha_s$ , 其斜率为正数.

实践表明, 在土壤类型和粗糙度基本相同的的前提下, 土壤反照率主要取决于土壤水分. 混合像元上下包络线之间仍存在逐渐过渡的等土壤湿度线. 也就是等斜率线与等湿度线重合.

## 2 分层波文比切割法的建立和理论依据

上述研究动态中指出, 许多二层模型的创意大都体现在土壤-植被阻力网的处理上. 实践表明, 复杂的阻力网的计算需要地表粗糙度、局地风速、大气稳定度、摩擦速度、莫宁-奥布霍夫长度、边界层高度等. 模型越复杂, 在区域尺度的反演就越不可操作, 而往往只能停留在田间微气象尺度上.

在没有平流的前提下, 利用波文比切割可能利用能量(净辐射通量减去土壤热通量), 可以方便获取显热通量和潜热通量. 这种简化途径可以免去空气温度和地表各种阻力参数. 这两类参数正是遥感手段无法直接获取的.

作为显热通量与潜热通量之比的波文比有 3 个控制因子: 土壤水分含量、热量与水汽的湍流输送系数差异以及分子扩散差异. 事实上土壤水分含量构建了土壤水分可供率. 在波文比的 3 个影响因子中, 土壤水分可供率起着主导作用. 热量和水汽的湍流输送系数的差异以及分子扩散差异对波文比的作用是次要的. 水面的水汽是饱和的. 利用干湿表常数  $\gamma$  和饱和水汽-温度斜率  $\Delta$  表达干空气和湿空气的分子扩散差异以及热量和水汽的湍流输送系数的差异是有物理基础的. 在水汽饱和的地表或水面的波文比是下限值.

地表通量的波文比与土壤水分可供率的关系是能量切割法的理论基础. 土壤水分可供率  $M$  和地表潜热通量  $LE$  有非常明确的函数关系. 当土壤供水保持不变时,  $M$  也不变. 引入作物缺水指数  $F$ <sup>[3]</sup> 和波文比  $\beta = H/LE$ ,  $H$  为显热通量,  $LE$  为潜热通量, 它们之间的关系有:

$$1 - F = M = \frac{LE}{LE_0} = \frac{H}{\beta LE_0}, \quad \beta = \frac{H}{MLE_0}, \quad (26)$$

(26) 式揭示了土壤水分可供率、缺水指数与波文比之间的严格而又简捷的物理表达式. 关键是引入土壤水分可利用率和波文比的函数关系. 对于一层遥感蒸散模型, 可以运用这种思路. 土壤水分可利用率和波文比可以利用 PCACA 近似获取, 对第  $i$  个混合像元, 有:

$$M_i \approx \frac{T_{mH} - T_{mi}}{T_{mH} - T_{mL}} = \frac{LE_i}{LE_0}, \quad (27)$$

$$\beta_{mi} \approx \frac{T_{mH} - T_{mL}}{T_{mH} - T_{mi}} - 1, \quad (28)$$

其中  $T_{mi}$  是在某一覆盖率下的第  $i$  个混合像元的真实温度(近似可用辐射温度),  $T_{mH}$ ,  $T_{mL}$  分别为第  $i$  个混合像元相同覆盖率的干线、湿线上的真实温度. 二层模型能否运用这种思路? 下述将回答此问题. 在 N95 的平行二层模型中仅采用了 Priestley-Taylor 近似<sup>[27]</sup> 可以得到植被蒸腾的表达式<sup>[15]</sup>:

$$LE_v = af \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_{nv}, \quad (29)$$

其中  $R_{nv}$  植被表面净辐射通量,  $a$  是实验系数, Priestley-Taylor 的多年积累指出, 其平均值等于 1.26<sup>[27]</sup>. 在作物冠层表面, Norman 采用 1.3, 后来, Kstas 在玉米和棉花冠层采用 2.0.  $f$  是绿色植被覆盖率. 与 Priestley-Taylor 原表达式相比, N95 模型似乎认为在有绿色植被上的水汽是接近饱和的. 这应该认为也是一种近似. 波文比与斜率及干湿表常数的函数表达式应该是

$$(R_n - G) = (1 + \beta)LE, \quad (30)$$

$$\beta = \frac{\Delta + \gamma - a\Delta}{a\Delta}.$$

在公式(29)中的  $af [\Delta/(\Delta + \gamma)]$  这项类似波文比. 事实上, N95 模型已经采用了分层切割可利用能量的方法. 从上述的分析看出, 分层波文比切割法是有理论与实践根据的. 他们为二层模型运用能量切割法开创先例. 按照上述思路进一步扩展, 在我们能够分别获取土壤和植被冠层的净辐射通量后, 进一步又能够分别获取土壤和植被冠层表面的波文比, 土壤和植被冠层表面的潜热通量和显热通量就可以获取. 作出土壤表面温度-覆盖率和植被冠层表面温度-覆盖率两个散点图. 并以(17), (19), (20)和(21)式的计算值获得梯形框架, 而后根据下两表达式就可以分别得到第  $i$  个像元的覆盖率下的土壤和植被的波文比  $\beta_{Si}$ ,  $\beta_{Vi}$ ,

其中  $LE_{mi}$ ,  $LE_0$  分别为像元的实际蒸散(土壤蒸发+植被蒸腾)和潜在蒸发。

(4) 土壤水分有效利用率  $\zeta$  分布图的反演, 其模型如下:

$$\zeta_i = \frac{LE_{vi}}{LE_i} \approx \frac{LE_{mi} - LE_{si}}{LE_{mi}} \quad (45)$$

其中  $LE_{si}$ ,  $LE_{vi}$  分别为像元的土壤蒸发和植被蒸腾。

(5) 植被冠层  $CO_2$  同化通量  $\varphi_{CO_2i}$  分布图的反演, 其模型如下:

$$\varphi_{CO_2i} = K \frac{E_{vi}}{D_i} LAI_i^n \quad (46)$$

其中  $E_{vi}$  是第  $i$  像元植被蒸腾量, 其量纲为  $mg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$  与  $\varphi_{CO_2i}$  的量纲相同, 而不是上述蒸腾潜热通量  $W \cdot m^{-2}$ .  $D_i$  为植被冠层上空的空气饱和差,  $K/D_i$  构成无量纲参数,  $K$  的量值为  $1/58$ , 与  $C_3$  作物有关系数.  $n = 1.2$ . 求出  $LAI_i$  为叶面积指数. 假设空气饱和差  $D_i$  与植被缺水指数  $\zeta_i$  有线性关系,

$$\frac{D_j}{\zeta_j} = \frac{D_i}{\zeta_i} \quad (47)$$

上述下标  $i$  为像元序号, 其中  $\zeta_i$ ,  $D_i$  分别为某气象站的观测值. 可以根据  $\zeta_i$ ,  $D_i$  作出  $D_i$  的区域分布图. 这比无物理意义的空间内插方法更有依据.

## 4 试验结果和算法验证

### 4.1 地面支撑观测和卫星数据处理

根据 PCACA 算法的要求, 理想的地面支撑观测配置应有 4 个极端值进行理论定位. 也就是 4 个定标场: 干裸地、湿裸地, 干全覆盖植被地、湿全覆盖植被地. 每个定标场的空间尺度至少应该有 1~2 个卫星像元尺度. 为了合理利用人力和物力资源, 往往可以进行干点组合和湿点组合. 干裸地、干全植被组合成一个定标场, 成为干点定标场. 湿裸地, 湿植被覆盖组合成一个定标场, 成为湿点定标场. 像元尺度的定标场的基本建设投资较大, 无论是基础研究还是实时应用监测均是十分需要的. 但是, 在现实的情况下, 这种基本建设从立项到使用要有一个较长的过程. 为了及时对新提出的算法进行验证, 我们采用东平湖星地同步观测场、禹城综合试验场、县级气象站相

结合的途径. 具体分别阐述如下.

东平湖星地同步观测场位于山东省东平湖湖面. 我们在 2000 年 10 月开始组织固定观测人员进行长期定位观测. 从与 NOAA-AVHRR 卫星同步观测发展到同时与 NOAA-AVHRR 卫星以及 MODIS 卫星同步观测. 当这两颗卫星过境时, 观测人员驾驶非机动车, 从岸边驶向湖心, 边驶边观测. 约 15 min. 到达湖心时正值卫星过境, 然后返回岸边, 也是边驶边观测. 观测时间共约 30 min. 这种观测方式达到巡回监测的目的. 也是我们多次提倡的同步观测方法. 可以消除地面或湖面增温或降温所引起的观测误差. 也可消除岸边湖面温度和湖心湖面温度的差异给平均湖面温度所带来的误差. 观测内容有离湖面 1.5 m 高处的气温、气湿、风速、净辐射通量. 湖面温度用浮标式的水面温度计观测. 用于定标或校正卫星数据反演值. 气湿、风速、净辐射通量的观测数据可以作为充分饱和湿点的观测数据的参考资料.

禹城农业生态试验场位于山东省禹城县, 是中国科学院生态网络定位观测站. 建站已经有 20 多年. 观测项目较多. 有包括遥感试验场在内的 10 多个观测场. 唯观测场的面积较小, 不够 MODIS 卫星热红外波段像元的尺度. 因此观测数据只能作为参考, 万不得已要用热红外温度观测数据协助土壤和植被温度定标时, 要非常慎重. 目前站内其他项目开展的地表通量观测数据, 同样可以慎重地用于验证遥感反演的地表通量输出结果.

每个县都有气象站. 这种空间密度的气象站, 观测的 10 m 风速以及百叶箱观测的气温气湿均可作为参考值. 当我们在温度-植被散点图中找到 4 个最高温度的干裸地像元和干全覆盖植被像元, 以及找到最低温度的湿裸地像元和最低温度的湿全覆盖植被像元后, 可以根据这 4 个像元点的经度纬度找到最近的县气象站, 运用这 4 个气象站的观测数据, 协助计算 4 个极端温度, 从而确定梯形框架.

美国宇航局的 MODIS 卫星产品中有陆地表面温度(LST). 因为有部分 LST 产品数据与东平湖的同步观测值相差较大, 不能直接使用. 所以我们仍然要进行全过程的反演. 在获取 MODIS 数据后, 首先以 MODTRAN4.0 进行大气辐射传输订正. 进行几何纠

正, 多波段的地理位置配准. 特别是需要获取热惯量信息的场合, 需要进行不同时相数据的地理位置配准. 在可见光和近红外波段的数据可以进行消云处理. 研究区位置的选择和图像切割等预处理均是一般的图像处理技术. 不在本文详述.

我们采用了高配置的多台微机网进行计算, 达到多人同时而又分工地开展工作的平台. 工作平台是 ENVI4.0 软件包. 在其原有功能的基础上又开发了新的计算软件. 根据我们发展的模型和算法可以快速方便计算逐个像元的模型参数及地表通量.

#### 4.2 模型和算法的反演结果及其验证

本文的目的主要是在我们以前提出的遥感地表通量二层模型的基础上, 发展一种新的可操作的 PCACA 算法和分层能量切割算法. 本节表达的试验结果是为了验证这两个算法的物理基础, 验证在有限 MODIS 遥感数据的条件下反演地表通量的可行性及其能够达到的反演精度, 是属于方法学研究. 虽然我们已经在华北地区进行长期的地表通量监测工作, 限于篇幅及本文有限目标, 我们仅随机选择一天作全过程的反演. 关于地表通量长期监测的结果及其规律分析在另文表达.

图 3 是 2002 年 3 月 19 日的 3 波段真彩色合成图. 经度从  $111^{\circ}6'$  到  $120^{\circ}14'$ , 纬度从  $33^{\circ}3'$  到  $38^{\circ}38'$ . 图像覆盖了华北大部分省份和一部分渤海、东平湖定标场、禹城农业生态试验站、北京地区. 图像西北部有

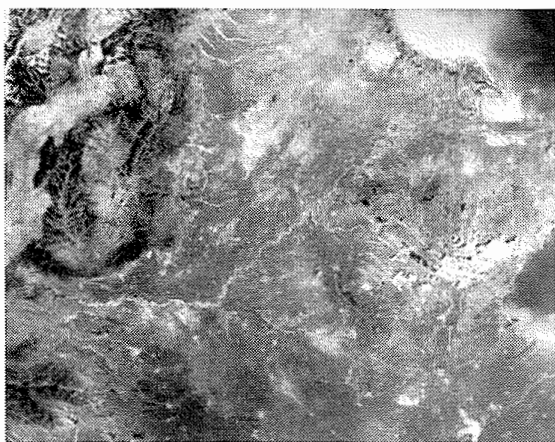


图 3 华北平原试验区的彩色合成图

时间在 2002 年 3 月 19 日, 东北角为渤海, 黄河可以分辨. 西北角有山区, 大部分地区为农耕地. 经度:  $111^{\circ}6' \sim 120^{\circ}14' E$ , 纬度:  $33^{\circ}3' \sim 38^{\circ}38' N$

山区.

首先表达 PCACA 算法和分层能量分割算法的结果. 图 4 是混合像元反照率和覆盖率的相关散点图. 包络线呈梯形, 但是在高覆盖率区有缺省部分. 这表明这些覆盖率的像元反照率分布不连续. 包络线的上线为高反照率, 下线为低反照率. 左上像元包络线(即反照率)不是直线而是具有峰值的曲线(见图中的白线), 它随覆盖率先变大后变小. 这是一个重要现象. 这表达土壤反照率和植被反照率加权平均的发展过程. 峰值左侧为土壤反照率控制区, 峰值右侧为植被反照率控制区, 峰值为两者的平衡点. 正如上述, 反照率遵循辐射平衡. 由包络线确定的上线和下线是分解混合像元反照率的基线. 由这两条基线, 确定反照率随覆盖率变化的斜率. 再根据(24)式和(25)式分别反演出土壤反照率和植被反照率的区域分布图. 这是两幅地表通量计算过程中的图像, 限于篇幅, 不在此显示.

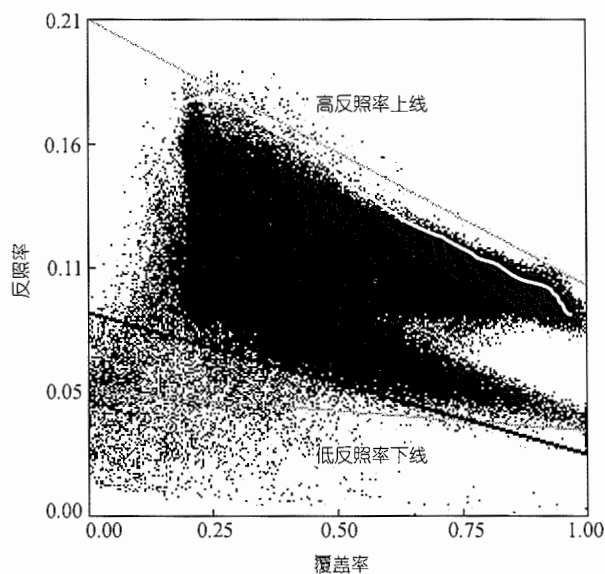


图 4 混合像元的地表反照率和覆盖率的相关散点

在此进一步强调, 由于地表热红外辐射温度是地表热能平衡的综合产物, 它受净辐射通量、土壤热通量、显热通量和潜热通量的控制. 它有双重性, 既难以测定, 又必须测定. 因此, 混合像元表面温度与覆盖率的二维相关散点图是 PCACA 算法的核心. 从 MODIS 卫星数据网站下载了热红外波段图像后, 要



进行大气辐射订正、以及地面定标场同步观测数据的标定, 获取被监测区域的地表辐射温度分布图. 然后与地表比辐射率和大气下行辐射的分布图一起, 反演为地表真实温度分布. 其计算公式均在上节表达了. 见(32)和(33)式. 其中要计算的分布图有辐射温度分布图、比辐射率分布图、早晨-中午辐射温度差值分布图, 按照县气象站作出大气下行辐射分布图. 同样, 这些中间过程分布图不在此表达.

下一步, 根据下载的 MODIS 的可见光和近红外波段的数据, 计算出  $NDVI$  植被指数分布图. 再根据(35A)式作出覆盖率分布图. 在 ENVI 平台上作出混合像元真实温度-覆盖率相关散点分布图.

在图 5 散点图包络线上作出实况干线 AB 和实况湿线 CD. 这也是上包络线和下包络线. 在上包络线覆盖率小的部分, 也就是裸地和植被稀少并且温度高于 295 K 的部分, 存在像元缺省现象. 在同样的覆盖率而温度低于 295 K 的部分, 像元点比较稀疏. 这部分可能是湿地、水体和沙滩.

下包络线比较平直, 呈现出正梯度. 表明这些像元点的土壤温度低于植被冠层温度. 在湿地、水体和沙滩往往存在这种情况.

为了提高 PCACA 算法的精度, 确定绝对对干线  $A'B'$  和绝对湿线  $C'D'$  的位置是关键. 也就是根据上

述理论定位的 4 个表达(15)式、(16)式、(17)式和(20)式, 计算出  $T_{SD}$ ,  $T_{SW}$ ,  $T_{VD}$  和  $T_{VW}$ . 其中符号的意义同前. 正如上面所述, 这 4 个点的温度应该在定标场观测并计算出来. 但是, 目前的条件还没有达到. 因此, 我们拟运用目前的气象站和生态站的观测数据. 具体的步骤概述如下: 在散点图的实况干线和实况湿线上找到最干裸地像元、最干全植被覆盖像元、最湿裸地像元、最湿全植被覆盖像元. 确定这 4 个像元点的经度和纬度, 并找到这 4 个点的最近的县气象站或生态站, 运用这些气象站和生态站的风速、气温、气湿等观测数据, 以及根据 MODIS 卫星数据和(35A)式、(35B)式计算出  $NDVI$  和叶面积指数分布图, 确定这 4 个像元的叶面积指数, 综合一起计算出这 4 个像元点的粗糙度和空气动力学阻力, 最后计算出  $T_{SD}$ ,  $T_{SW}$ ,  $T_{VD}$  和  $T_{VW}$ .

当绝对对干线和绝对湿线定位后, 根据线性内插原理确定每个像元点的斜率, 然后将斜率代入方程(9), 联合方程(1)解出每一个像元的土壤表面真实温度和植被冠层表面温度, 也就是作出这两种温度的区域分布图. 这就完成了 PCACA 的工作.

通过禹城站的太阳辐射观测数据和太阳辐射随纬度和时角变化的表达式方程(37A), (37B), 计算出太阳入射辐射分布图. 结合已经作出的土壤表面反

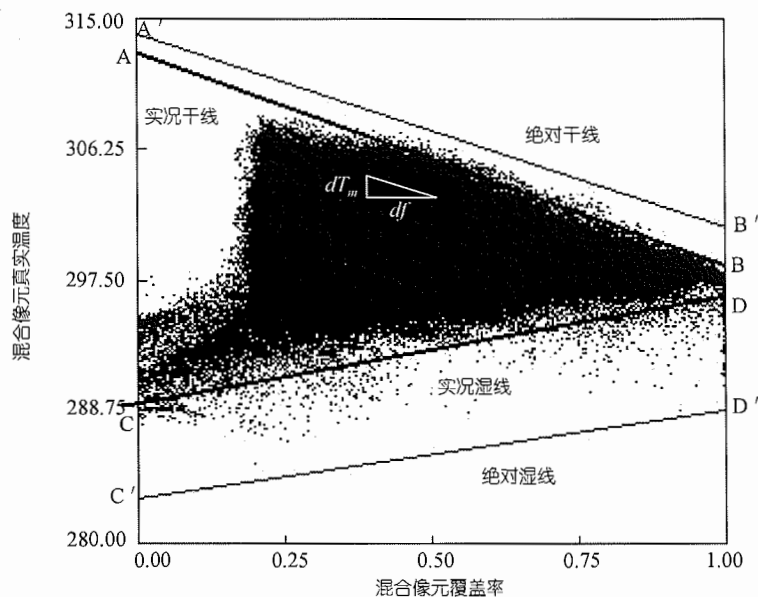


图 5 混合像元的地表真实温度和覆盖率的相关散点图

照率和植被冠层反照率、土壤表面真实温度分布图和植被冠层真实表面分布图、大气下行辐射分布图，一起代入方程(38), (39), 分别作出土壤净辐射通量分布图和植被观测净辐射通量分布图. 为了节省篇幅, 这

两幅图也不在本文显示.

植被冠层表面分布图与覆盖率分布图作出的散点图显示在图 6. 土壤表面温度和覆盖率相关散点图显示在图 7. 根据两幅关键图进行分层的能量切割算

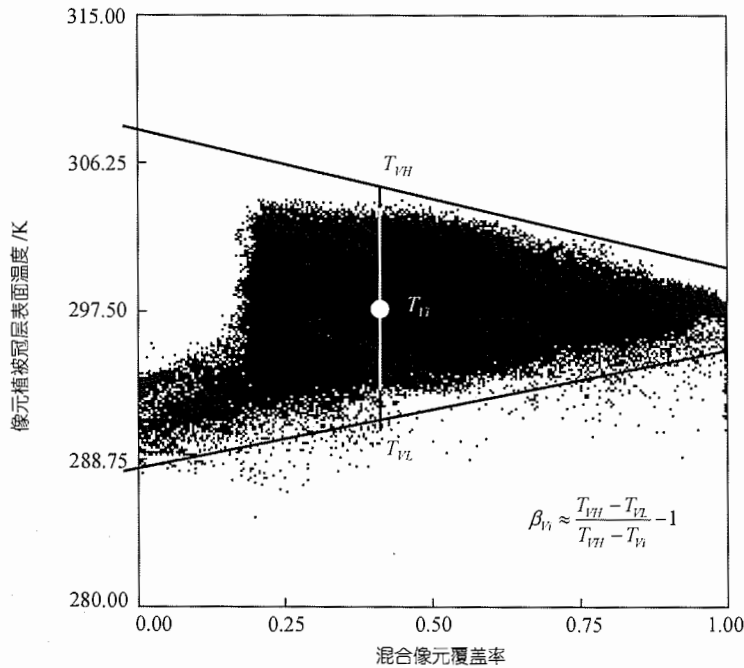


图 6 植被冠层表面温度-覆盖率相关散点图

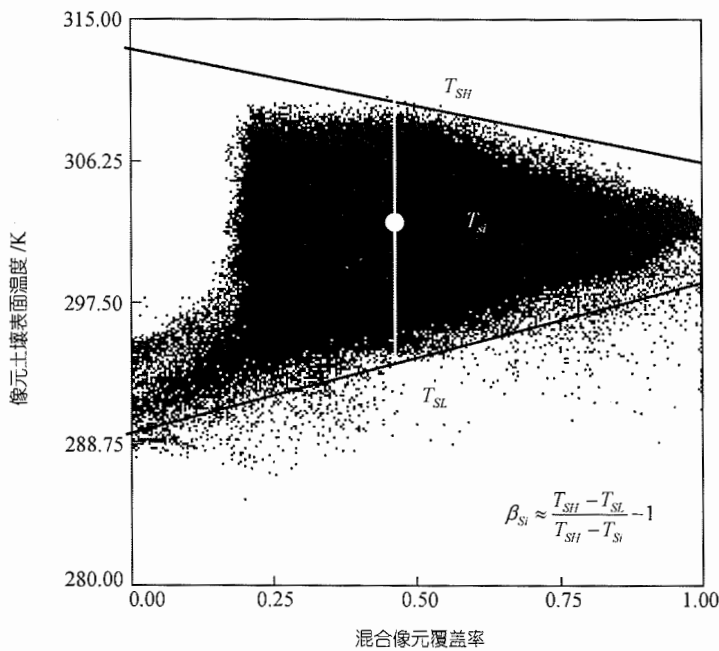


图 7 土壤冠层表面温度-覆盖率相关散点图

法. 类似 PCACA 算法作出绝对干线和绝对湿线. 然后根据方程(31A)、(31B)求出每个像元的土壤层波文比和植被冠层波文比分布图. 结合已经作出的土壤净辐射通量分布图和植被冠层净辐射通量分布图, 作出土壤蒸发分布图, 植被冠层蒸腾分布图. 这两幅分布图也不在本文显示.

植被二氧化碳同化通量的区域分布图是上述已经反演出的所有过程要素分布图的综合结果. 这幅分布图的可行性、合理性和精度的验证是关键. 抓住这一关键, 基本上可以确认 PCACA 算法、分层能量切割法的可行性、合理性和反演精度. 为此, 根据方程(46)、植被冠层蒸腾分布图、叶面积指数分布图和空气饱和差分布图作出植被冠层  $\text{CO}_2$  同化通量分布图. 其中空气饱和差分布图是根据方程(47)反演的, 需要禹城站的空气饱和差和缺水指数分布图.

现从反演的植被二氧化碳同化通量的量级及其

区域分布特征两方面进行验证. 反演的量级基本合理. 在禹城站涡度相关观测的数据表明, 在 3 月下旬 MODIS 卫星过境时刻二氧化碳同化通量不超过  $0.3 \text{ mg/s} \cdot \text{m}^2$ . 在分布图中的较黑色斑块是农耕地小麦长势好的地区, 其量级在  $0.17 \sim 0.25 \text{ mg/s} \cdot \text{m}^2$ . 像山东省济宁地区的高二氧化碳同化通量均能够合理反映出来. 在山区、渤海海边地区以及泰山地区的低二氧化碳同化通量分布特征也均能够反映出来(图 8).

与我们以前提出的模型算法相比, 其差别是: 以前提出的模型是用热惯量信息建立的模型进行混合像元的温度分解, 本文运用 PCACA 算法分解混合像元温度. 以前运用 Beer 定律分解净辐射通量, 运用余项法计算植被蒸腾量. 本文运用分层能量切割算法获取植被蒸腾通量. 因此, 我们认为当较理想的干点和湿点的地面定标场建立后, 本文提出的模型和算法将有一定的优势. 目前, 在这两个定标场建立之

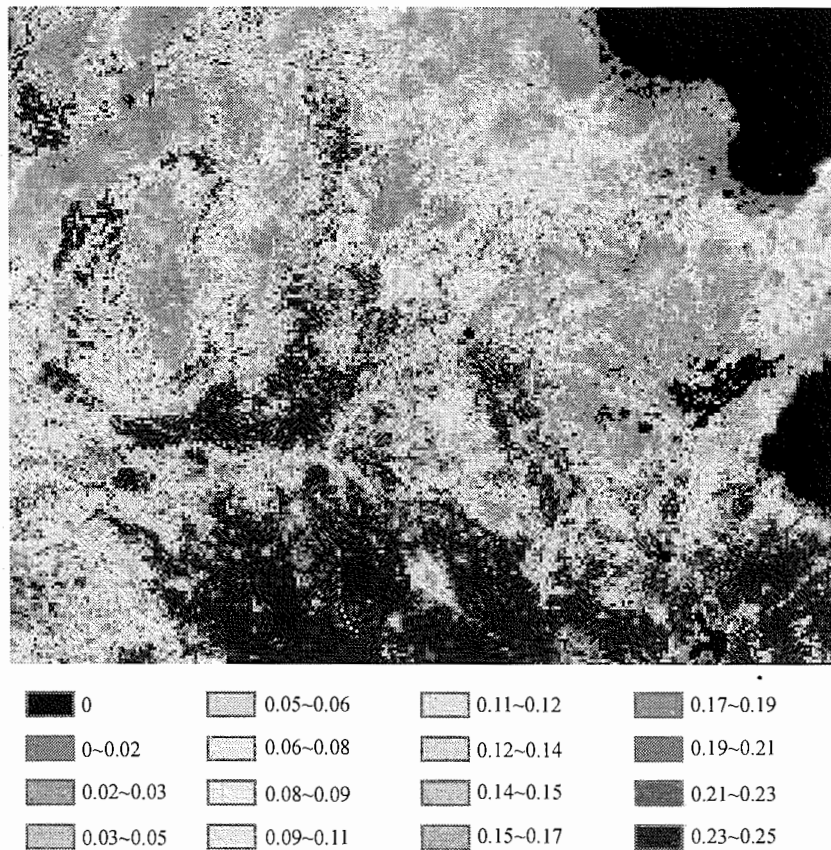


图 8 华北地区植被  $\text{CO}_2$  同化通量分布图(单位:  $\text{mg/s} \cdot \text{m}^2$ )

前,我们将同时运行这两种模型,取长补短,相得益彰。

## 5 结论与讨论

(1) 本文提出了 PCACA 算法. 首先分解混合像元组分温度, 进一步结合干点和湿点定标场的参数测定值, 推算到 4 个极端的混合像元真实温度, 从而确定在当时气象和生态条件下的梯形框架. 以绝对干湿线获取  $dT_m/df$  等斜率线(等土壤湿度或等可利用水分线). 并分析了 PCACA 分解混合像元温度的假设条件. 指出本算法中土壤和植被冠层的耦合机制是修正的二层模型, 不是补丁或斑块(patch)二层模型. 在这种假设条件下, 干线和湿线之间存在逐渐过渡的等土壤湿度线, 并与等斜率线一致. 本文提出的思路与 Moran 的研究试验成果以及 Carlson 的研究成果相呼应<sup>[24-26]</sup>. 这种算法已经将需要所有像元的空气阻力等数据压缩到 4 个极 endpoint. 这 4 个点所需的数据完全可以通过定标场的观测获取. 从不可操作发展到可以操作, 应该说跨越了一大步.

这种假设的不确定性来自像补丁或斑块二层平行模型的机制, 成块的土壤和植被有截然不同的土壤水分状况. 例如混合像元中包含了面积比例相近的村庄和农田; 面积比例相近的大片干裸地和水体, 这种情况就需要运用补丁或斑块二层平行模型. 本文的 PCACA 模型将会产生较大的误差. 庆幸的是, 根据像元实际土地覆盖抽样检验, 上述两种情况的像元数比例仅在 10% 左右.

(2) 本文提出了理论定位计算, 提高了干线和湿线的定位的可靠性. 克服了 PCACA 方法的不确定性. (这不确定性是由于像元的干湿情况和覆盖率分布的缺失, 所引起的像元上下包络线的变形造成的).

但是, 由于干点和湿点定标试验场尚未建立, 本试验是运用 4 个极 endpoint 附近的县气象站观测数据计算的, 存在一定的误差. 两个线性关系和一个土壤植被共水分源的假设条件不能满足时, 也存在一定的不确定性.

(3) 根据我们在中国西北腾格里沙漠的试验证实的一层模型能量切割法的可行性<sup>[30]</sup>以及 Norman 等在 N95 模型中证实的植被净辐射通量切割法的可行性,

本文提出了二层分层能量切割算法, 这种算法的前提是没有水平平流. 算法简捷明了并具有物理基础. 摆脱了难以逐个像元获取的通量阻力网参数. 许多通量模型的阻力网表达式过于复杂, 实际上根本无法操作.

从传统的概念, 这种方法的不确定性主要是忽略了平流的影响. 然而由于非均匀地表以及通过地-气相互作用造成的大气非均匀是引起水平平流影响的根源. 并且水平平流又与大气变性的速度和尺度有密切关系. MODIS, NOAA-AVHRR 热红外波段数据的空间分辨率为  $1.1 \text{ km} \times 1.1 \text{ km}$ . 从尺度转换角度分析, 我们认为对于这种空间尺度所获取的像元尺度的平均表面温度和净辐射通量, 平流的影响将有一种乐观的新概念: 水平平流影响 200 m 的风浪区(fetch)应该只影响到 1100 m 像元的边缘部分. 而像元内部非均匀性引起的水平平流影响大部分可能被平均效应所淹没. 当然, 进一步像元尺度的平流影响试验是必须的.

(4) 本文以 PCACA 算法分解混合像元的反照率. 联合二层分层能量切割算法, 从而可以分解混合像元的净辐射通量. 克服了传统以 Beer 定律分解净辐射通量的不确定性.

(5) 具有像元尺度的干点和湿点的地面定标场建立后, 本文提出的模型和算法将有较好的应用前景.

## 6 结束语

以定量遥感反演区域地表通量的难点在于非遥感参数(空气温度、计算阻力所需要风速和粗糙度等)的获取. 从 20 世纪 70 年代中期, 红外测温仪的出现以及最简单的蒸发与红外温度的相关方程的提出, 至目前各种复杂定量模型的发展, 已经有 30 年时间了. 仔细分析最近大家熟悉的模型, 凡是希望在区域尺度上作出贡献的, 没有一个不在热红外辐射温度和植被指数上寻找和挖掘信息. SEBAL 模型最大的特色是不需要空气温度, 模型中建立了一个空气温度与地表红外辐射温度的经验关系. 如果这个经验方程的系数对所有像元均相同的话, 实质上独立信息源仍是红外辐射温度. N95 二层模型最大的特色能够反演每个像元的植被蒸腾值, 他们确认植被蒸腾

是植被覆盖率、温度-饱和水汽压斜率、植被净辐射通量的函数。也就是用斜率和覆盖率构成的波文比去切割植被冠层净辐射通量。斜率取决于地表温度。因此实质上该模型的独立信息源也是红外辐射温度和植被指数。完全可以理解他们的思路,因为在光学遥感中,除了这两种信息源以外,没有其他信息可以支持逐个像元的反演。有人提出利用边界层高度的消长来反演区域尺度的地表通量<sup>[31]</sup>,但是需要每个像元的探空气球数据,这也是不可实现的。因此,Carlson 看到了实质和现实,直截了当运用红外辐射温度-植被指数推算区域地表通量。Carlson 客观地评价他的方法,虽然不完善但是非常可取<sup>[24]</sup>。他作为美国数值预报模型及其模拟的元老科学家之一,有如此认识,不能不作为我们的明鉴。

本文为这种简捷研究途径,提出了一些新的思路和方法,以便有兴趣的学者参考。

### 参 考 文 献

- Price J C. Estimation of regional scale evapotranspiration through annalist's satellite thermal infrared data. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1982, GE-20: 286~292
- Jackson R D, Hatfield J L, Reginato R J, et al. Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements. *Agricultural Water Management*, 1983, 7: 351~362
- 张仁华. 以红外辐射信息为基础的估算作物缺水状况的新模式. *中国科学, B 辑*, 1986, (7): 776~784
- Friedl M A. Modeling land surface fluxes using a sparse canopy model and radiometric surface temperature measurements. *J Geophysics Res*, 1995, 100: 25435~25446
- Chehbouni A, Nichols W D, Njoku E G, et al. A three component model to estimate sensible heat flux over sparse shrubs in Nevada. *Remote Sensing Rev*, 1997, 15: 99~112
- Kalma J D, Jupp D L B. Estimating evaporation from pasture using infrared thermometry: evaluation of a one-Layer resistance model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 51: 223~246
- Nichols W D. Energy budgets and resistances to energy transport in sparsely vegetated rangeland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, 60: 221~247
- Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land, (SEBAL) 1, Formulation. *Journal of Hydrology*, 1998, 3: 198~212
- Su Z. The surface energy system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Science*, 2002, 6(1): 85~99
- Deardorff J W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83: 1889~1903
- Dickson O T. Modeling evapotranspiration for three-dimension global climate model. *Geophysics, Monograph*, 1984, 29: 58~72
- Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crop-an energy combination theory. *Q J R Metrology, Soc*, 1985, 111: 839~855
- Choudhury B J, Monteith J L. A four-layer model for the heat budget of homogenous land surface. *Q J R Metrology, Soc*, 1988, 114: 373~398
- Choudhury B J. Estimation evaporation and carbon assimilation using infrared temperature data: vistas in modeling. In: Asrar, G, ed. *Theory and Applications of Remote Sensing*, John Wiley, New York, 1989. 628~690
- Norman J M, Kustas W P, Humes K. Source approach soil and vegetation energy flux in observation of directional radiometric surface temperature. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1955, 77: 263~293
- Kustas W P, Choudhury B J, Moran M S, et al. Determination of sensible heat flux over sparse canopy using thermal infrared data. *Agric For Meteorol*, 1989, 44: 197~216
- Kustas W P, Norman J M. Evaluation of soil and vegetation heat flux prediction using a simple two-source model with radiometric temperature for canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 94: 13~29
- Kustas W P, Norman J M. A two-source energy balance approach using directional radiometric temperature observation for sparse canopy covered surface. *Agronomy Journal*, 2000, 92: 847~854
- Kustas W P, Timmermans W J, French A N. An intercomparison of two remote sensing-based energy balance modeling schemes. 2004. *Proceedings of IGARSS04*
- 李召良, Stoll M P, 张仁华, 等. 利用 ATSR 数据分解土壤和植被温度的研究. *中国科学, E 辑*, 2000, 30(增刊): 27~38
- 陈镜明. 一种遥感监测蒸发模型和它的改进. *科学通报*, 1988, 33(6): 454~458
- 张仁华, 孙晓敏, 朱治林, 等. 遥感区域地表植被二氧化碳通量的机理及其应用. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(2): 215~224
- 张仁华, 孙晓敏, 刘纪远, 等. 定量遥感反演作物蒸腾和土壤水分利用率的区域分异. *中国科学, D 辑*, 2001, 31(11): 959~968
- Carlson T N, William C, Rjobert J G. A New Look at the Simplified Method for Remote Sensing of Daily Evapotranspiration. *Remote Sens Environ*, 1995, 54: 161~167
- Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface -air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens Environ*, 1994, 49: 246~263
- Moran M S, Humes K S, Pinter Jr P J. The scaling characteristics of remotely-sensed variables for sparsely-vegetated heterogeneous landscapes. *J of Hydrology*, 1997, 190: 337~362
- Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review*, 1972, 100: (2): 81~92
- 张仁华. *实验遥感模型及地面基础*. 北京: 科学出版社, 1996
- Kimes D S. View Angle Effects in the Radiometric Measurement of Plant Canopy Temperatures. *Remote Sensing of Environment*, 1980, 10: 273~284
- 张仁华, 孙晓敏, 朱治林, 等. 以微分热惯量为基础的地表蒸发全遥感信息模型及在甘肃砂坡头地区的验证. *中国科学, D 辑*, 2002, 32(12): 1041~1049
- Anderson M C, Norman J M, Diak G R, et al. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sens Environ*, 1997, 60: 195~216