
地表温度遥感反演进展与展望

李召良

Tel: 13501025240; (010) 82105077

Email: lizl@unistra.fr; lizhaoliang@caas.cn

个人研究方向与兴趣

- 定量热红外遥感的基础理论与应用

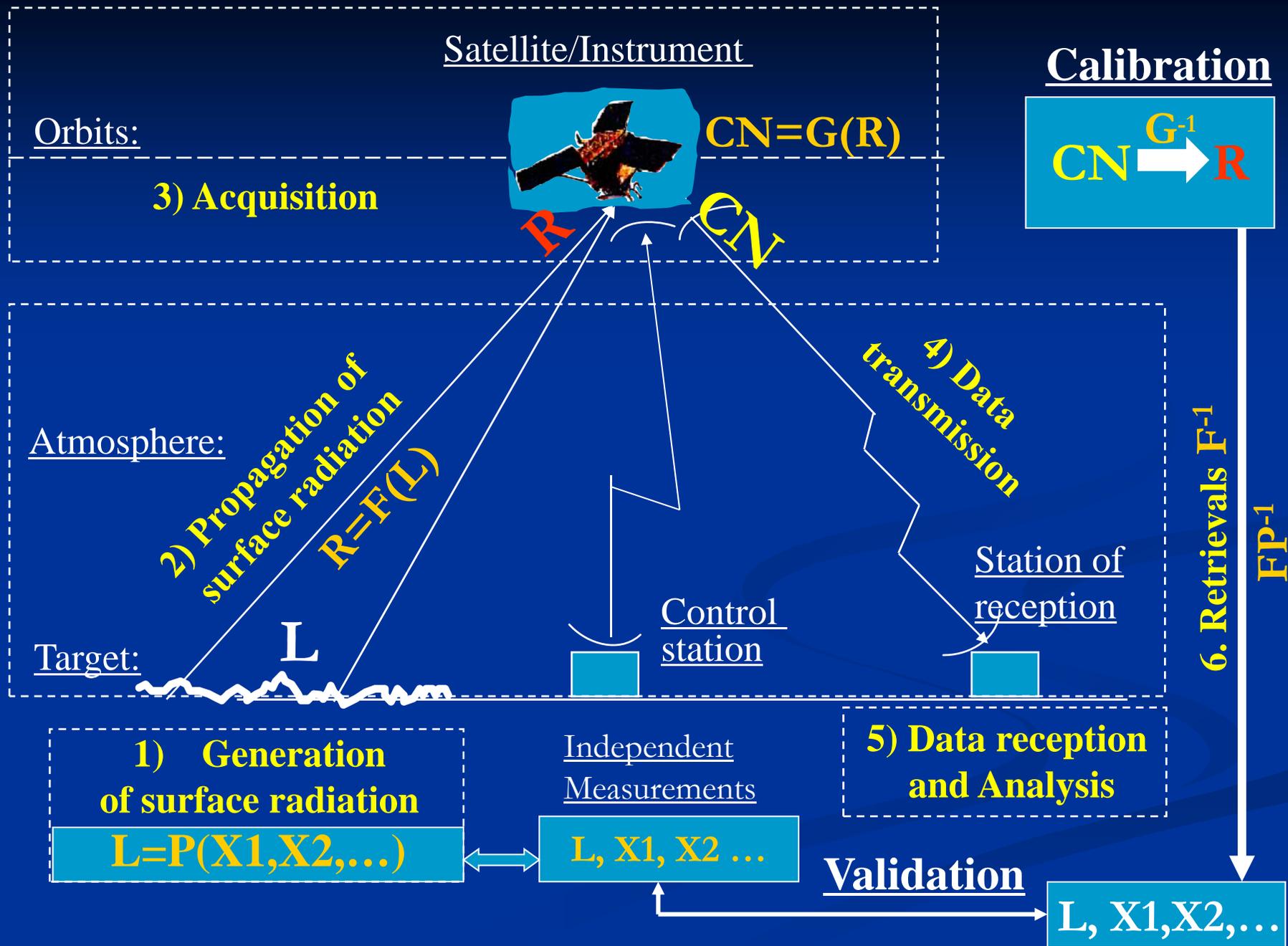
- 地表温度，地表比辐射率反演
- 大气廓线，大气水气含量反演
- 土壤湿度，土壤热惯量反演等

- 区域地表通量遥感反演模型

- 尺度转换



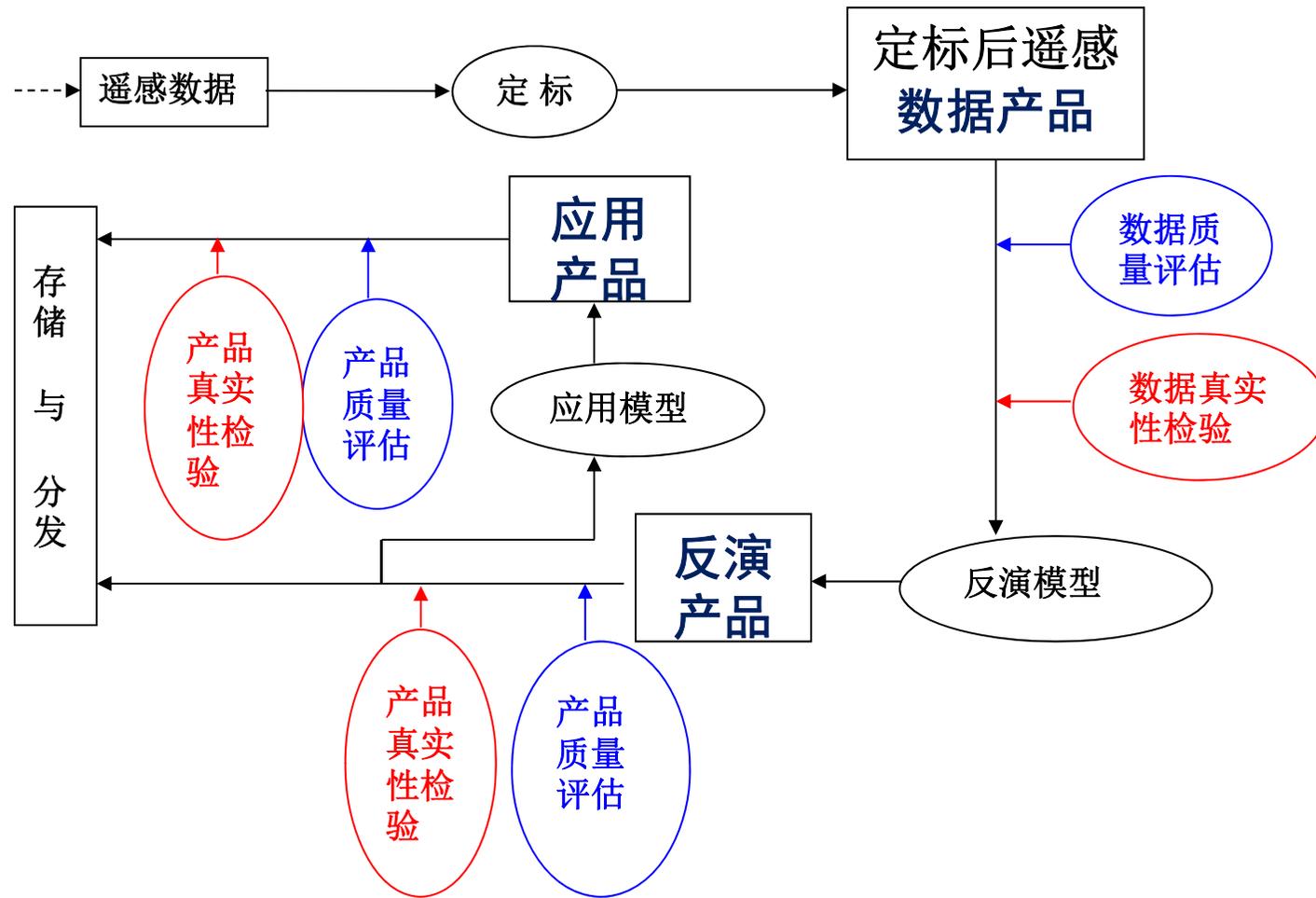
地表温度热红外定量遥感反演
进展与展望



遥感产品质量分析体系

- **定标**是把传感器输出信号转换为物理量的过程。
- **产品质量评估**是对产品的期望性能（如产品的取值范围和一般影像质量）进行评估的过程，但它只能评价产品的一致性和稳定性（标记产品异常），而无法告知用户产品的准确性。
- **真实性检验（Validation）**是用独立的方法来评价遥感数据产品、遥感反演产品及遥感应用产品的真实性和准确性，以及满足传感器设计指标要求程度的过程。

遥感数据处理流程



光学遥感可反演的陆地表面参数

直接
参数

可见光/近红外

中红外/热红外

地表反射率

地表温度/比辐射率

间接
参数

光合有效辐射

净第一生产力

叶面积指数

植被指数

反照率

净辐射

土壤水分

地表蒸散发

土壤热通量

土壤热惯量

地表温度的重要性

- 地表温度是众多基础学科和应用领域的一个**重要特征物理量**，能提供地表能量平衡状态的时空变化信息
- 地表温度既可作为地表过程等模型的**输入参数**，又可用于**验证**这些模型的输出结果
- 国际地圈生物圈计划 (IGBP) 将地表温度列为**优先**测定的参数之一

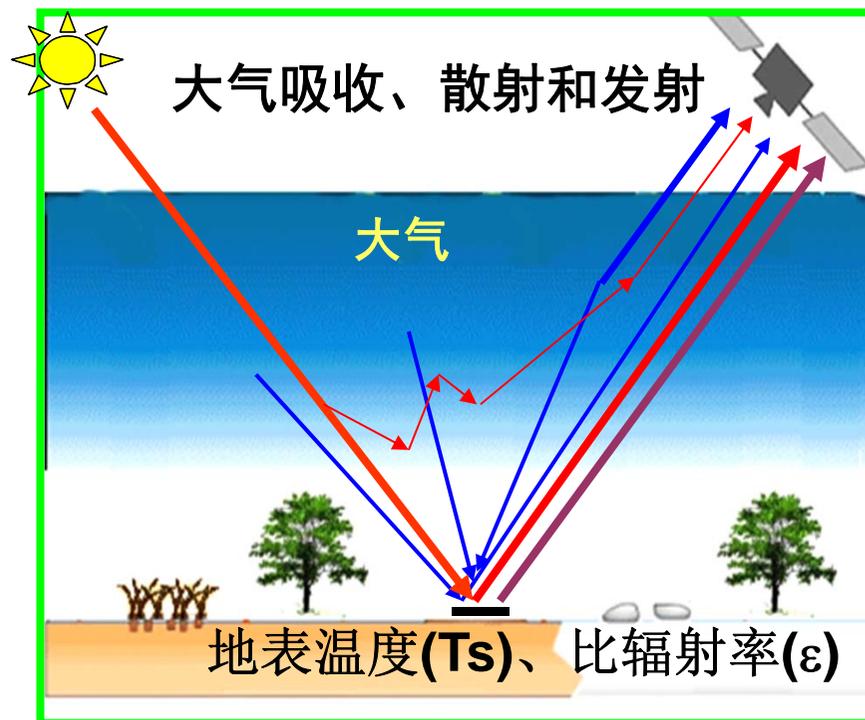
地表温度的遥感获取方式

◆ 热红外遥感反演地表温度

◆ 被动微波遥感反演地表温度

地表温度反演的难点

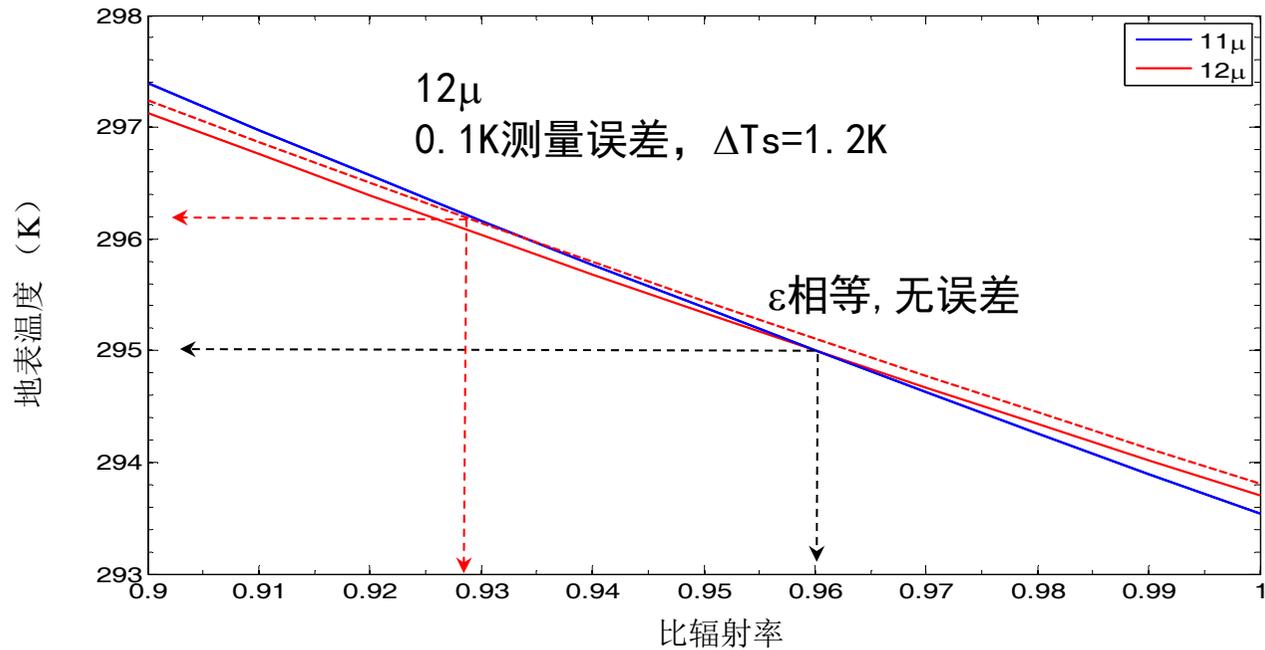
- 反演是欠定的：测量值个数总小于反演参数的个数，方程是病态求解
- 反演不稳定：测量量高度相关
- 地表温度、比辐射率、大气下行辐射三者耦合，相互制约和影响
- 大气纠正难：大气不仅有吸收、散射作用，其自身还有发射特性
- 中红外波段既包括地表和大气自身辐射以及地表反射的大气下行辐射，还包括地表反射的太阳辐射
- 地表温度与地表比辐射率的物理解译
- 反演参数地面验证困难



红外辐射传输方程：

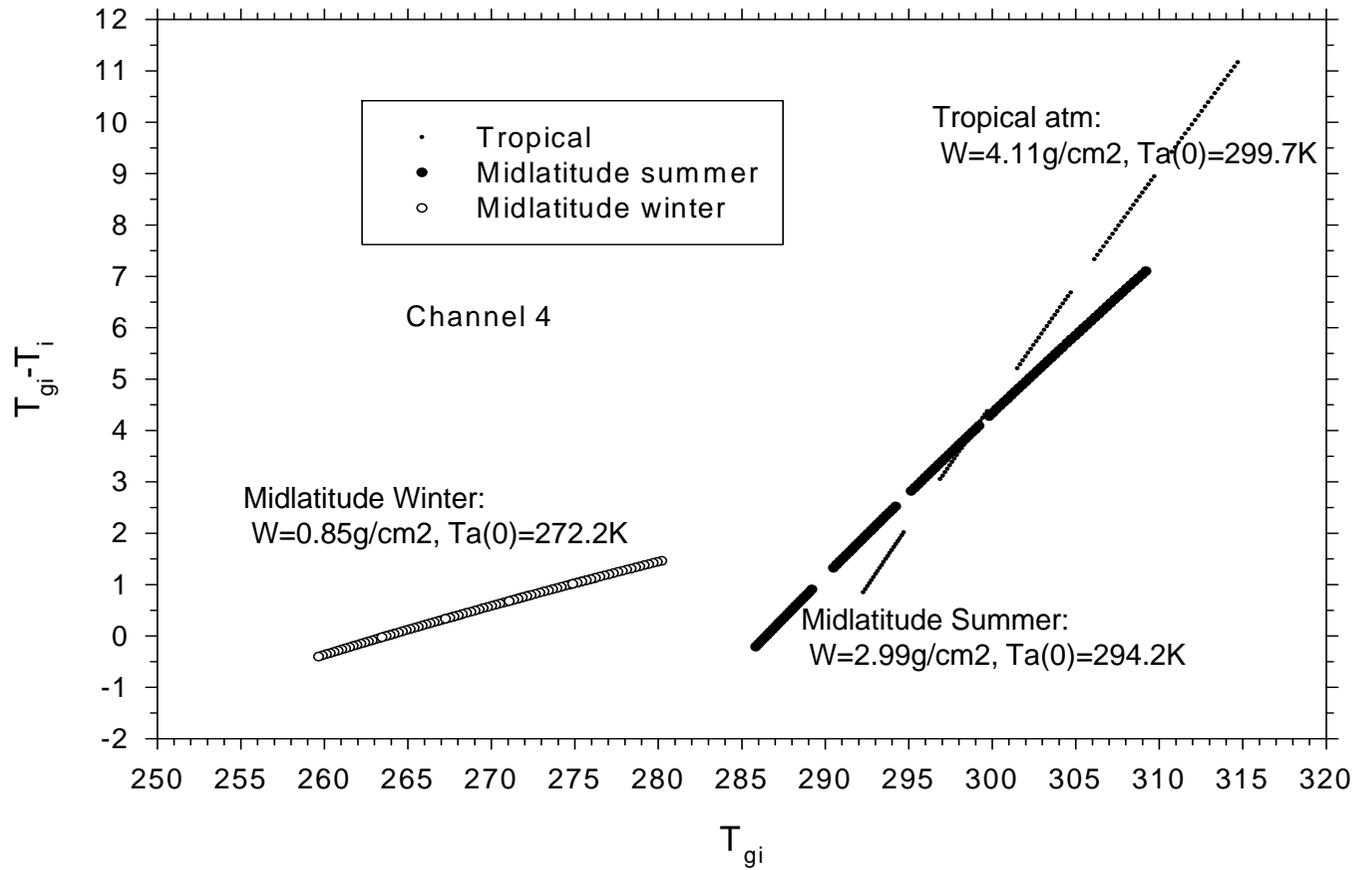
$$B_i(T_i) = \varepsilon_i B_i(T_s) \tau_i + (1 - \varepsilon_i) (R_{atm_i} \downarrow + R_{atm_i}^s \downarrow) \tau_i + R_{atm_i} \uparrow + R_{atm_i}^s \uparrow + \rho_{bi} R_i^s \tau_i$$

热红外测量值相关性示意图



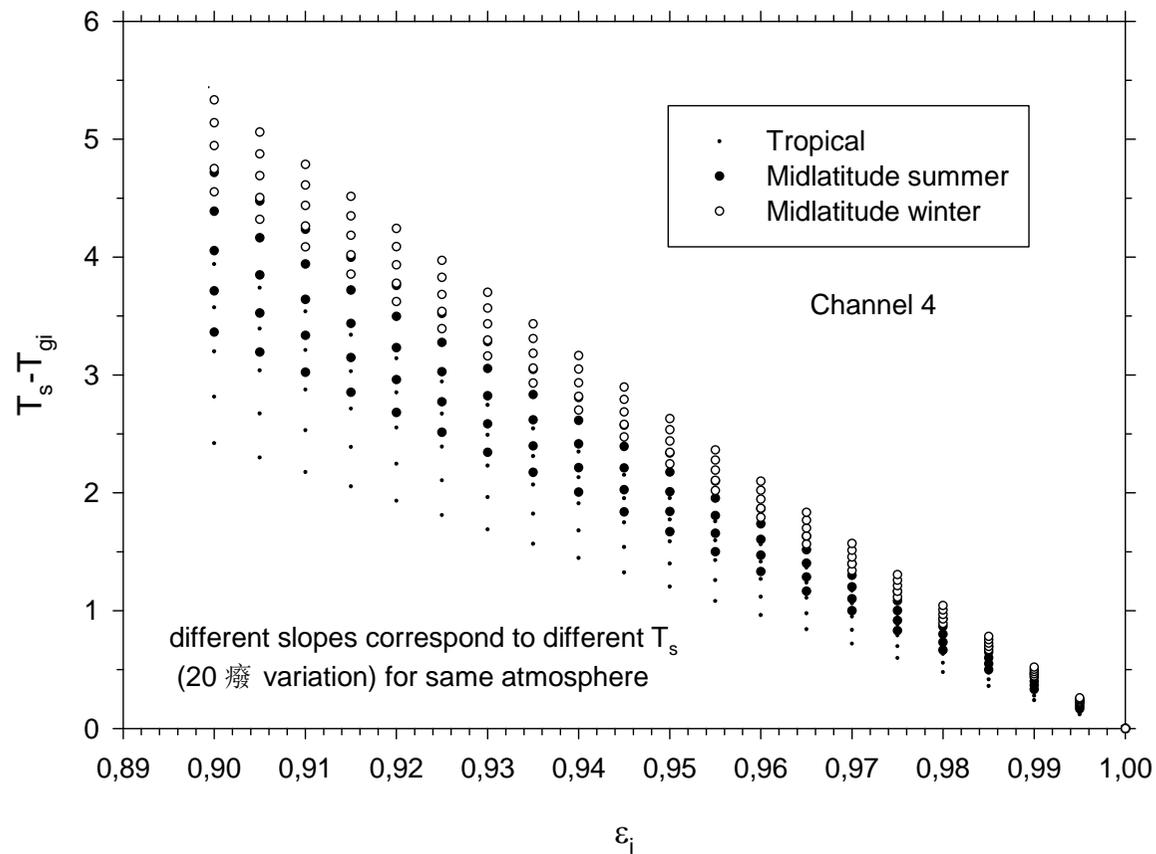
T_s 与 ϵ 的关系图

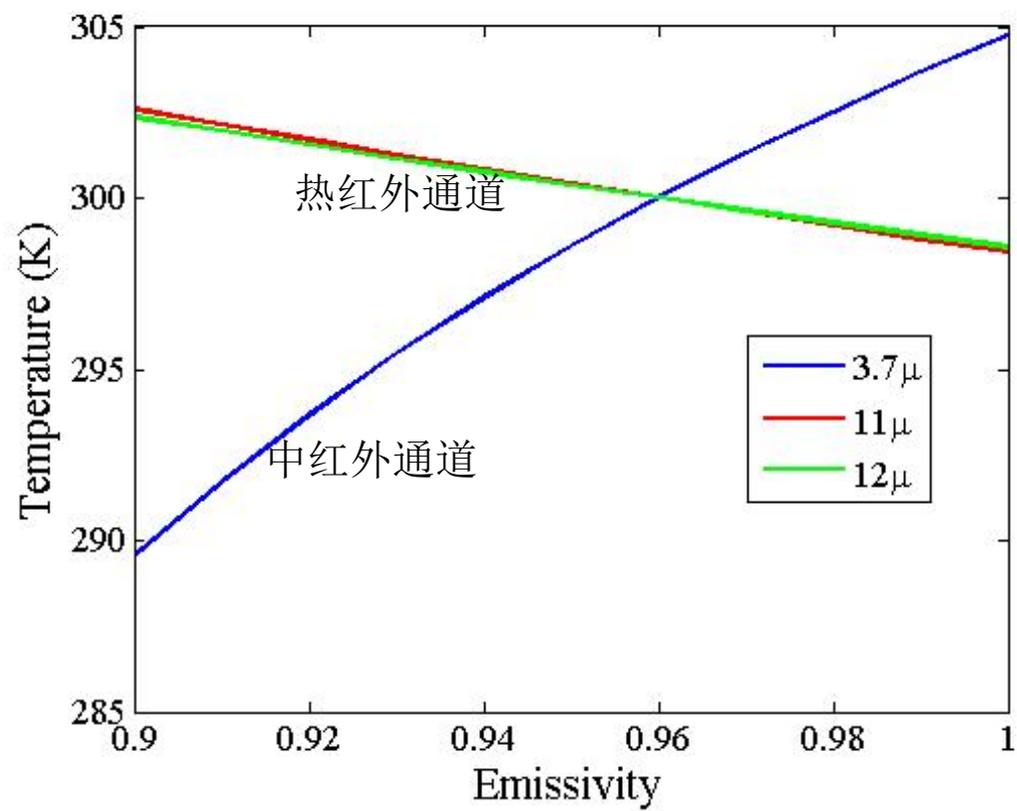
大气作用



比辐射率的影响

$$\delta T_{\varepsilon} \approx 0.2 \text{ 至 } 0.6 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}$$





通道相关性示意图

地表温度和比辐射率的定义

$$\langle \varepsilon \rangle = 1 - \langle r \rangle$$

$$\langle T_s \rangle = B^{-1} \left(\frac{\langle R \rangle - \langle r \rangle R_{atm\downarrow}}{1 - \langle r \rangle} \right)$$

地表温度反演现状

方法一

比辐射率 (ε) 已知, 确定地表温度 (T_s)

- 单通道法
- 双通道法-分裂窗算法
- 多角度法

方法二

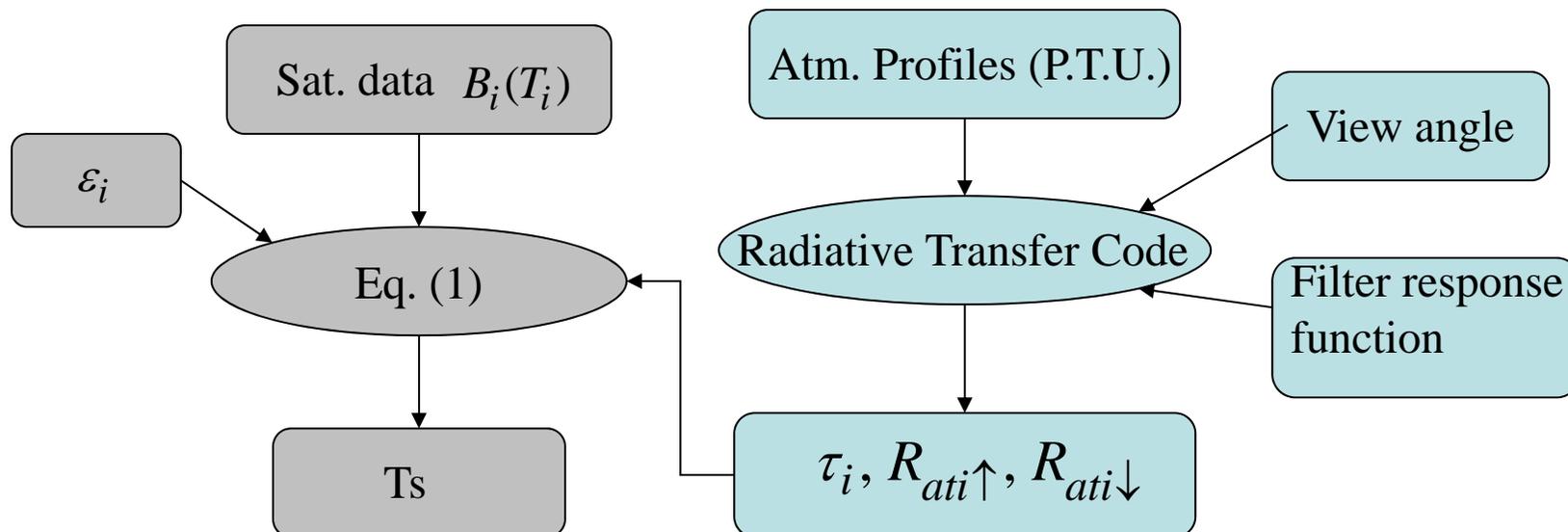
比辐射率 (ε) 未知, 求解 T_s 和 ε

- Stepwise retrieval method
- 已知大气信息, 同时求解 T_s 和 ε
- 同时求解 T_s 、 ε 和大气参数

比辐射率 (ϵ) 已知-Single Channel Method

- It takes the radiance measured by satellite in one channel and corrects it for residual atmospheric absorption and emission by a radiative transfer code which requires input data on the atmospheric profiles (P. T. U)
- Surface temperature is derived by inverting the radiative transfer equation

$$T_{si} = B_i^{-1} \left(\frac{(B_i(T_i) - R_{at_i} \uparrow) / \tau_i - (1 - \epsilon_i) R_{at_i} \downarrow}{\epsilon_i} \right) \quad (1)$$



比辐射率 (ε) 已知- Single Channel Method

- **The accurate determination of T_s using this type of method requires**

- A good quality of radiative transfer code
- A good knowledge of surface emissivity
- An accurate atmospheric profiles
- Correct consideration of Topographic effects

- **Drawback**

- Requirement of additional information (i.e. atmospheric profiles) which is usually not available with sufficient spatial density or at the time of the passage of satellite.

比辐射率 (ϵ) 已知-Split-Window Method

This method is based on the differential absorption in the two adjacent channels, centered at 11 and 12 μm , to correct for atmospheric effects.

线性

$$T_s = a_0 + a_1 T_i + a_2 (T_i - T_j)$$

Brightness temperature measured in two adjacent channels i and j

$$a_k = f_k(g_i, g_j, \epsilon_i, \epsilon_j, WV, VZA)$$

Spectral response function Total column water vapor viewing zenith angle

非线性

$$T_s = a_0 + a_1 T_i + a_2 (T_i - T_j) + a_3 (T_i - T_j)^2$$

比辐射率 (ε) 已知-Split-Window Method

线性

$$T_s = a_0 + a_1 T_i + a_2 (T_i - T_j)$$

非线性

$$T_s = a_0 + a_1 T_i + a_2 (T_i - T_j) + a_3 (T_i - T_j)^2$$

$$a_k = f_k(g_i, g_j, \varepsilon_i, \varepsilon_j, WV, VZA)$$

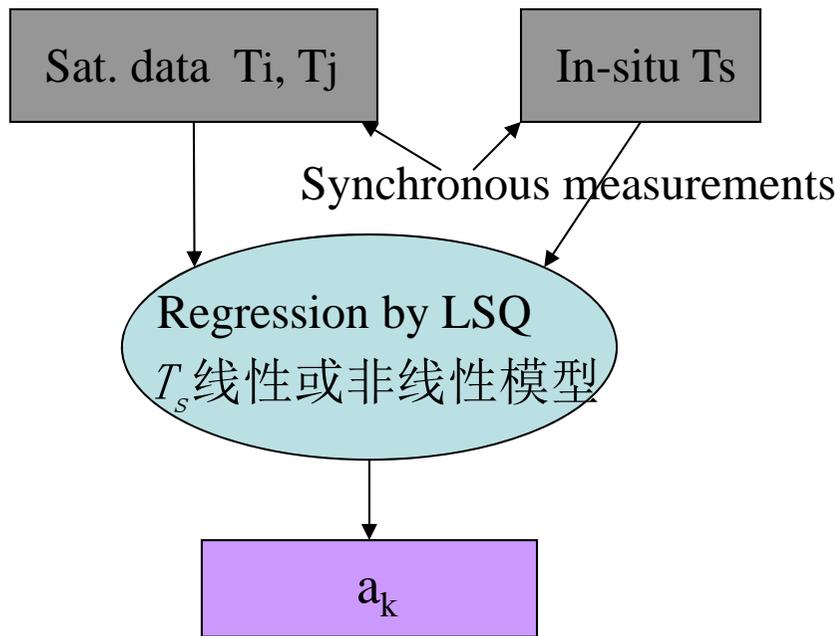
a_k
的
参数
化
方案

- 仅考虑地表比辐射率(LSEs)
- 考虑LSEs and WV
- 同时考虑LSEs, WV, and VZA

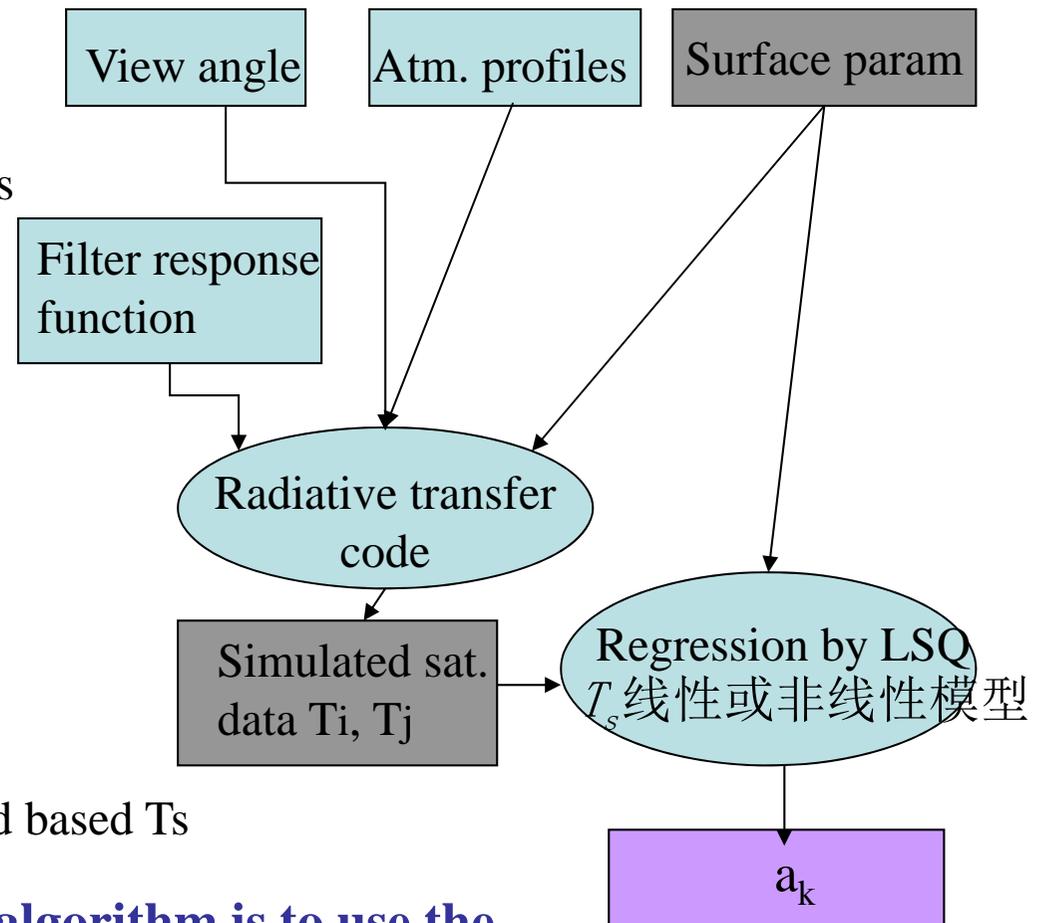
Accuracy of T_s retrieval is dependent on the correct choice of the coefficients a_k

Split-Window Method-How to get the coefficients a_k

➤ Empirical method



➤ Simulation method



➤ Little in-situ T_s data available

➤ Inherent difficulties in measuring ground based T_s

➡ **An efficient way to derive T_s algorithm is to use the simulation method**

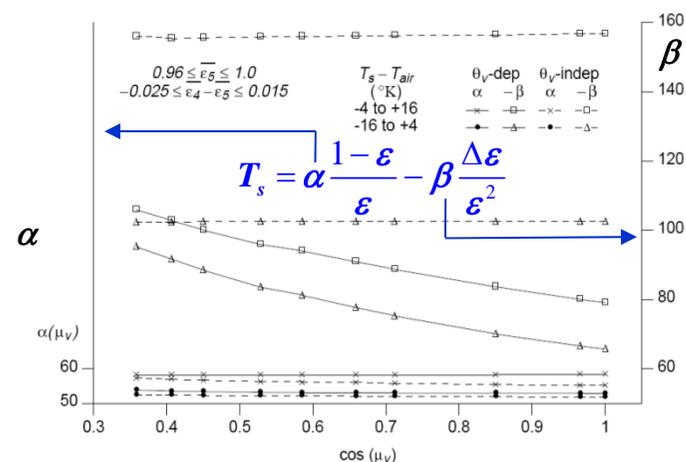
比辐射率 (ϵ) 已知-Split-Window Method

优点

- 无需大气廓线数据，无需考虑地形影响

缺点

- 分裂窗算法对 ϵ 的误差非常敏感
- ϵ 的确定具有很大的误差和不确定性



T_s 对 ϵ 的敏感性分析图

➔ 降低 T_s 的反演精度

比辐射率 (ε) 已知- Multi-angle Method

This method is based on the differential absorption due to the difference in atmospheric path length when an object is seen from two different view angles.

算法

线性:
$$T_s = T_n + p_1(T_n - T_f) + p_2 + p_3(1 - \varepsilon_n) + p_4(\varepsilon_n - \varepsilon_f)$$

非线性:

$$T_s = T_n + q_1(T_n - T_f) + q_2(T_n - T_f)^2 + (q_3 + q_4 WV)(1 - \varepsilon_n) + (q_5 + q_6 WV)\Delta\varepsilon + q_0$$

优点

- **Do not need to know the optical properties of the atmospheric absorbers. 无需大气廓线数据**

缺点

- 只适用于海水表面温度反演 (AATSR反演优于0.3K)
- 不能用于陆地表面温度反演
由于陆地表面三维结构和空间非均一性, 不同观测角度对应的象元大小不同, 组成成分不一致, 导致不同观测角度情况下地表温度不同

比辐射率未知- Stepwise retrieval methods

分两步：先确定比辐射率，再反演地表温度

代表性方法

1. **Classification-based emissivity method**
2. **NDVI-based emissivity method**
3. **Day/night temperature-independent spectral-indices (TISI) based method**

比辐射率未知- 已知大气信息，同时求解 T_s 和 ε

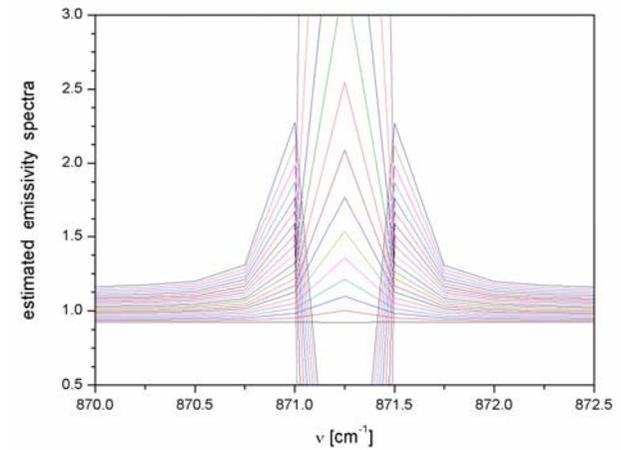
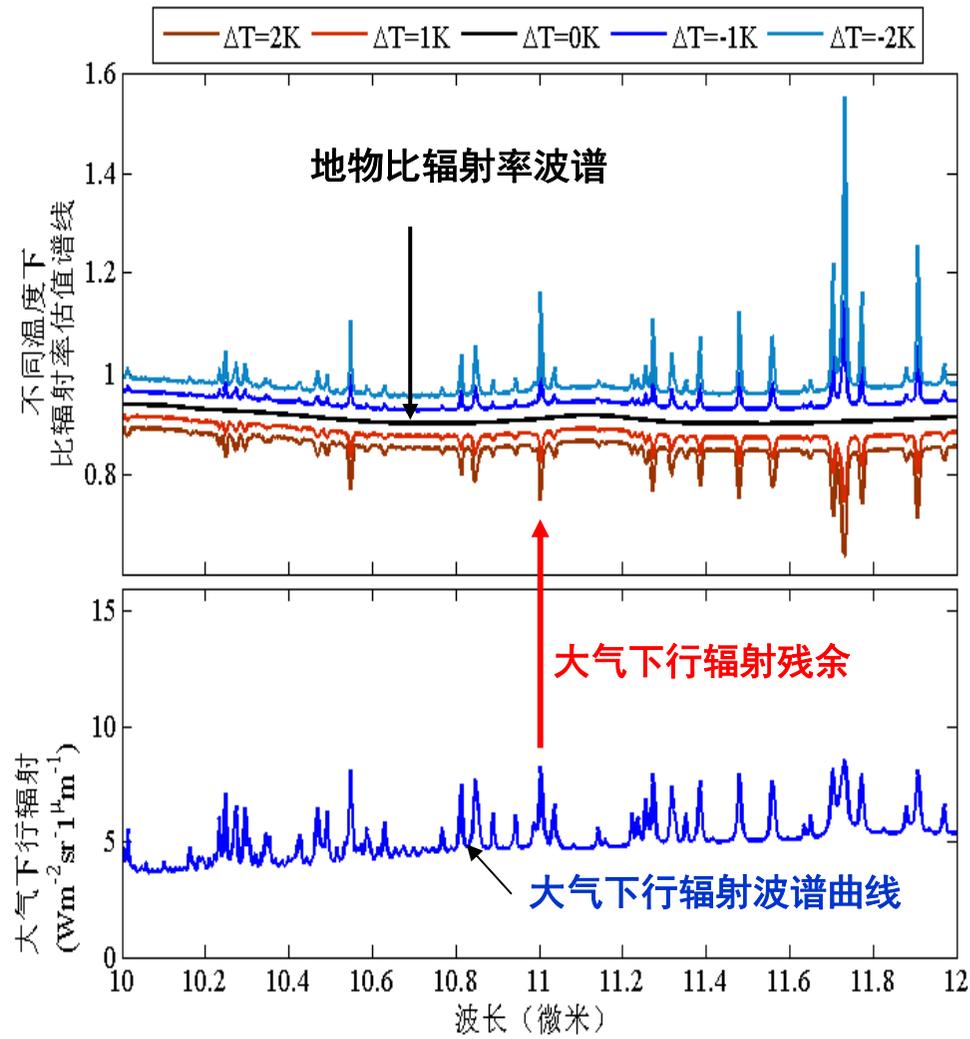
1. Two-temperature method (TTM)
2. Physics-based day/night operational method (D/N)

假定两个时刻 ε 不变，减少未知数，使方程数目大于未知数数目

代表性方法

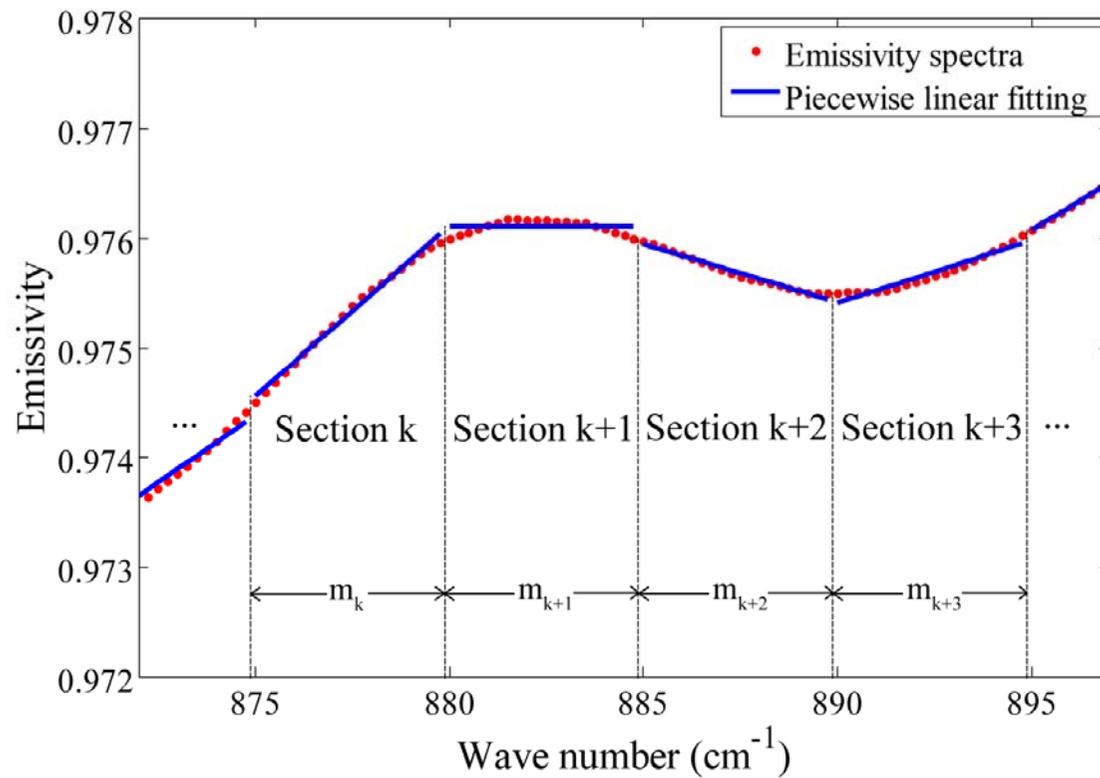
3. Gray body emissivity method (GBE)
4. Temperature emissivity separation method (TES)
5. Iterative spectrally smooth temperature emissivity separation method (ISSTES)
6. Linear emissivity constraint temperature emissivity separation method (LECTES)

ISSTES



奇异值示意图

LECTES



分段线性示意图

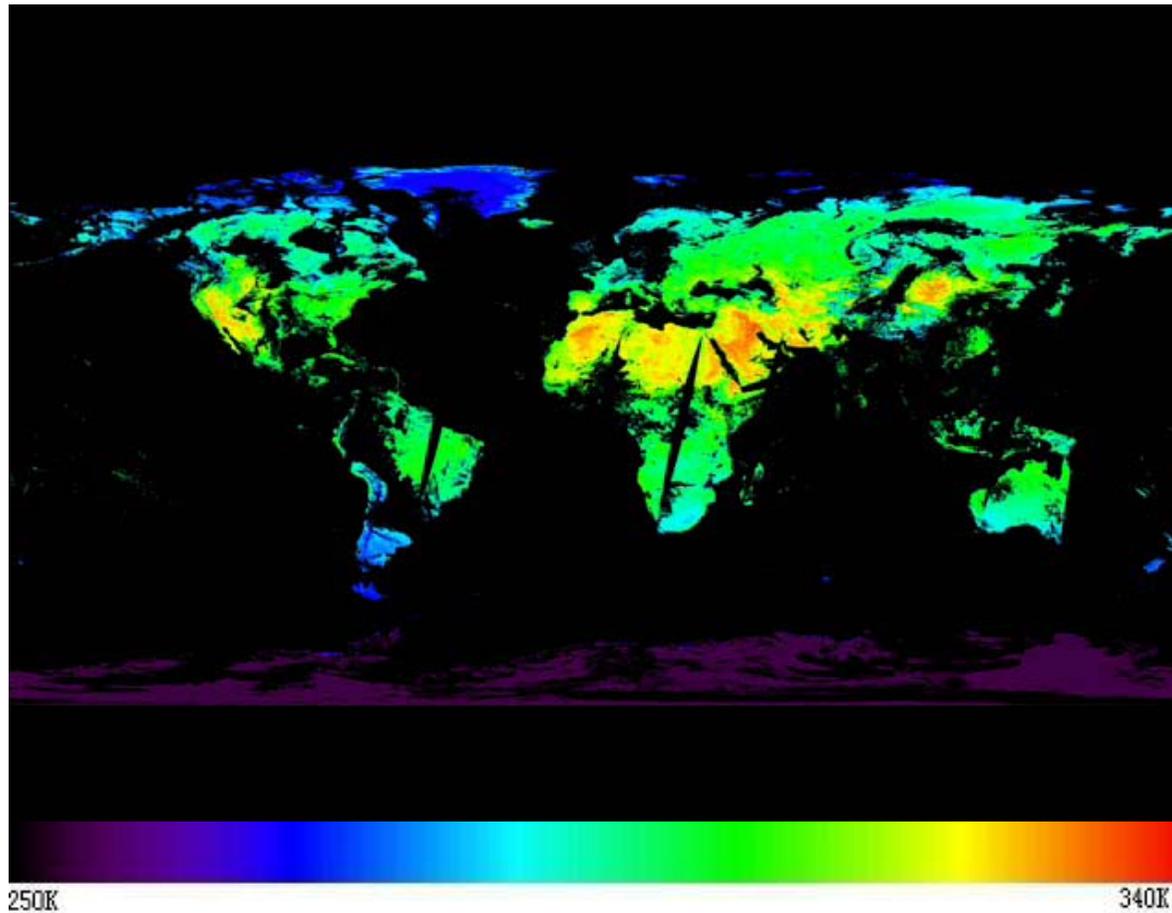
比辐射率未知- 同时求解 T_s 、 ε 和大气参数

代表性方法

1. Artificial neural network (ANN) method
2. Two-step physical retrieval method (TSRM)

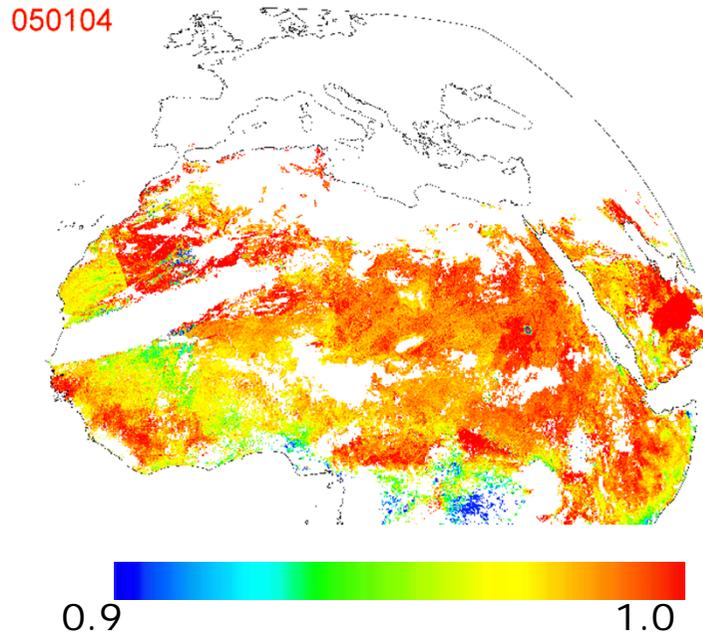
MODIS地表温度反演结果

MOD11C1全球地表温度产品
(2002.7月-9月)

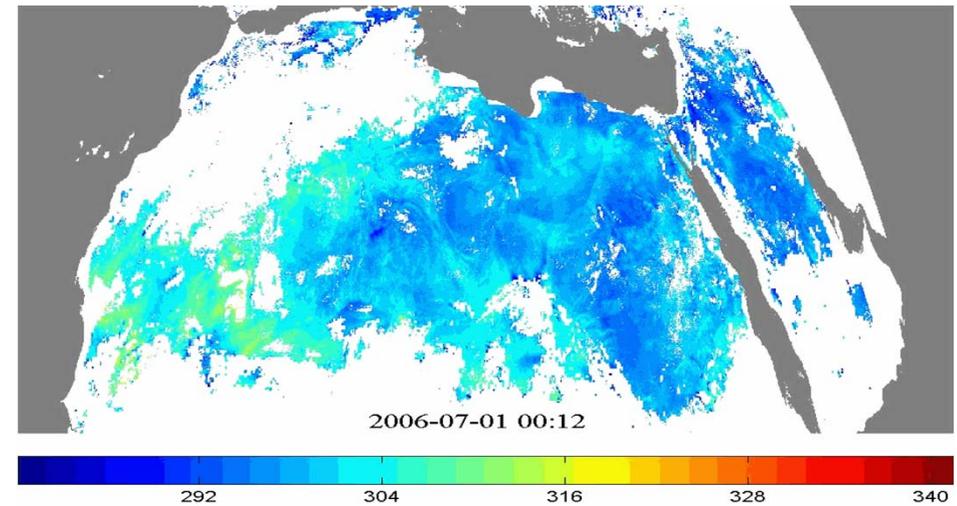


MODIS 多光谱算法获取的Ts图

静止卫星Ts反演结果示意图



热红外11 μm 地表比辐射率

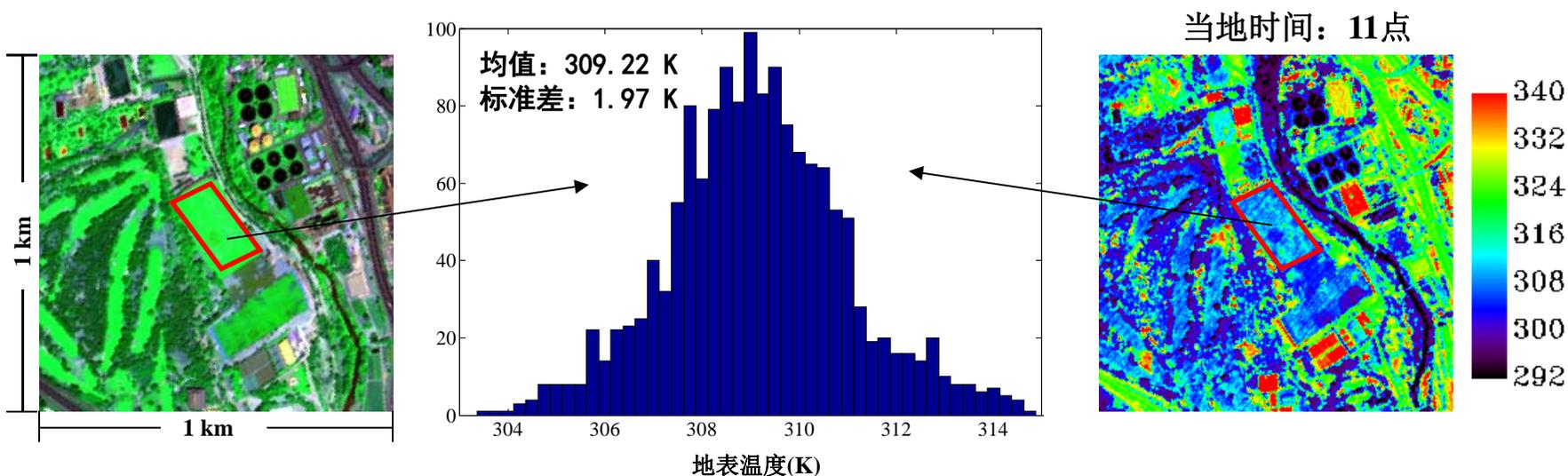


2006年7月1日SEVIRI地表温度结果

地表温度产品的真实性检验

存在问题

- 地面测量地表温度，由于受周围环境和比辐射率的影响，非常困难
- 地表温度空间变化差异大，地面获取代表km级像元尺度的温度真值更加困难



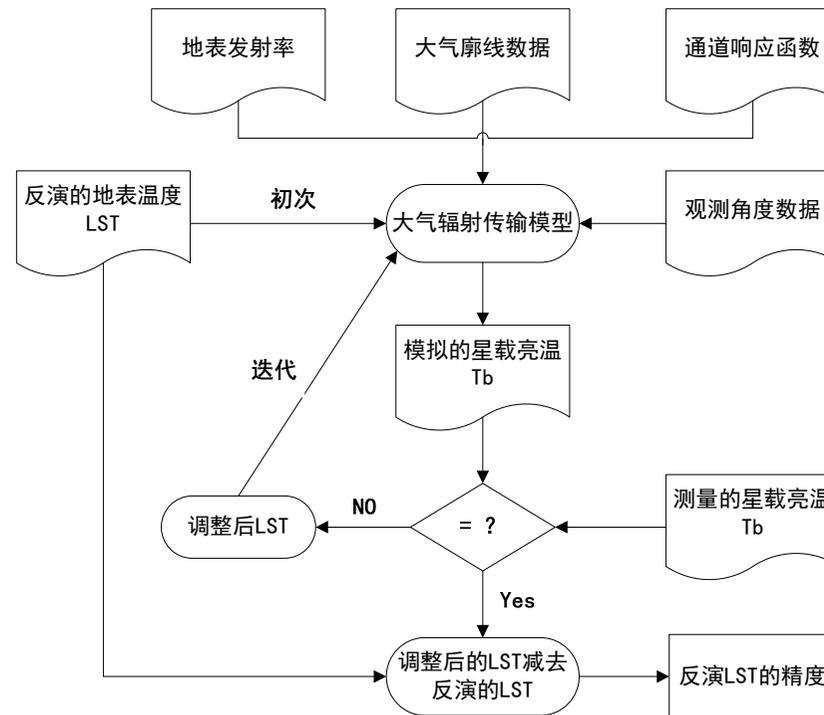
温度直接比对验证方法仅适合于湖面、海面、植被茂密区等温度均一地表，且只能于晚间进行，限制了温度产品的真实性检验

地表温度产品验证方法

1. Conventional temperature-based method



2. Advanced radiance-based method



基于辐射能的
地表温度验证
方法

3. Cross validation method

Validation of the MODIS LST products

(test sites)



Lake Titicaca



Mono Lake, CA



Walker Lake, NV



Rice field in Chico, CA



Bridgeport grassland, CA



Snowcover, Bridgeport, CA

Validation of the MODIS LST products

In wet atmospheric conditions: (1) three TIR radiometers deployed in a rice field in State of Mississippi

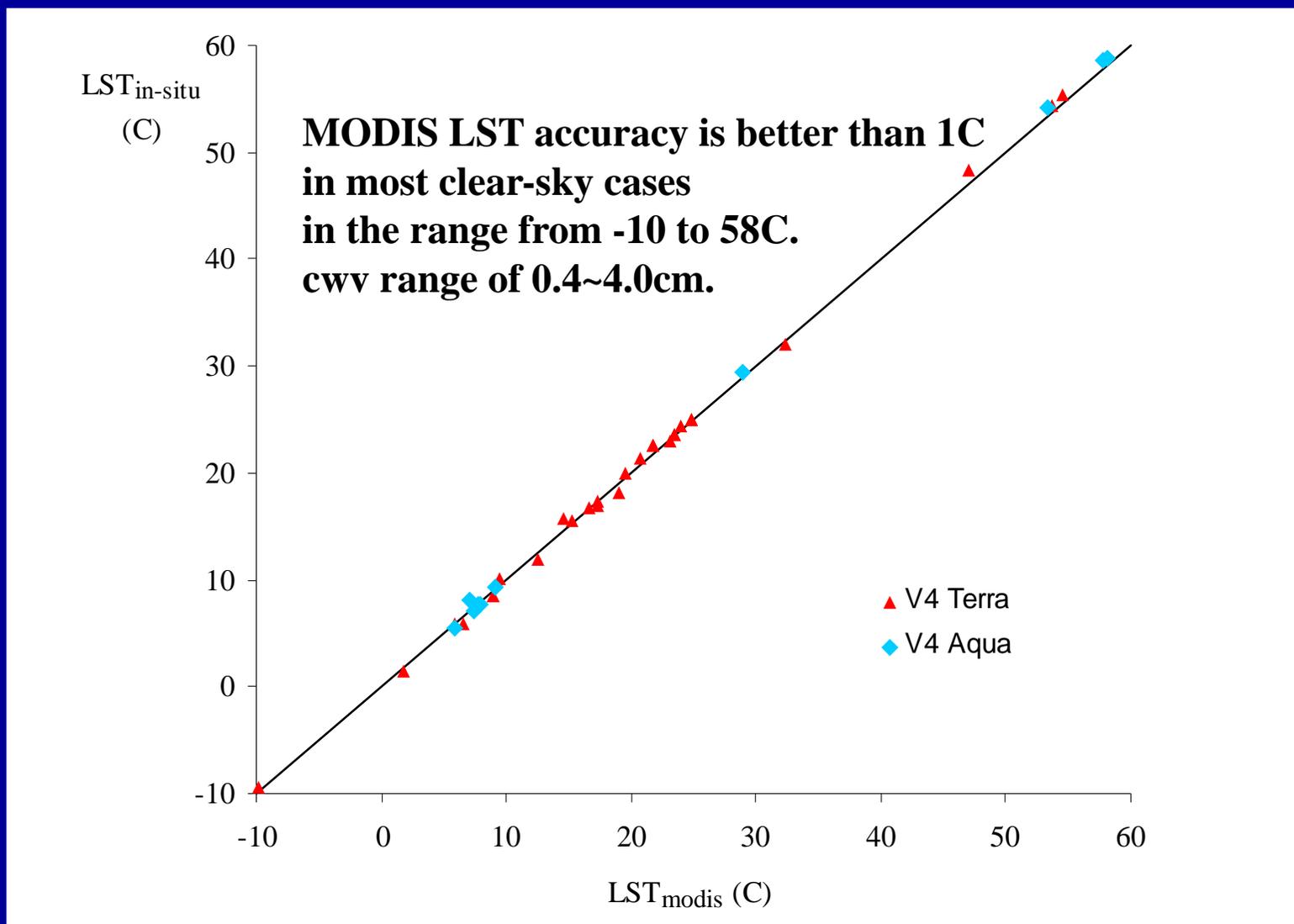


Validation of the MODIS LST products

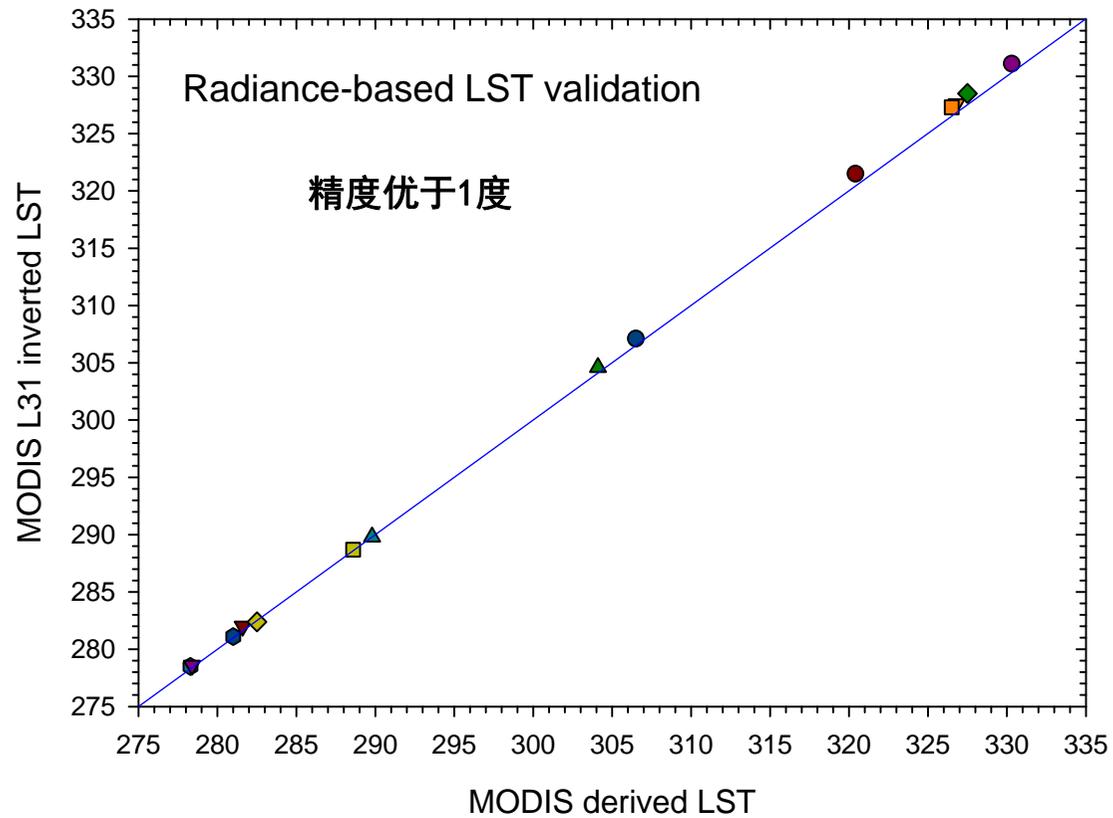
In wet atmospheric conditions: (2) five TIR radiometers deployed in a soybean field in State of Mississippi



Comparisons between V4 MODIS LSTs and in-situ values in field campaigns in 2000-2003

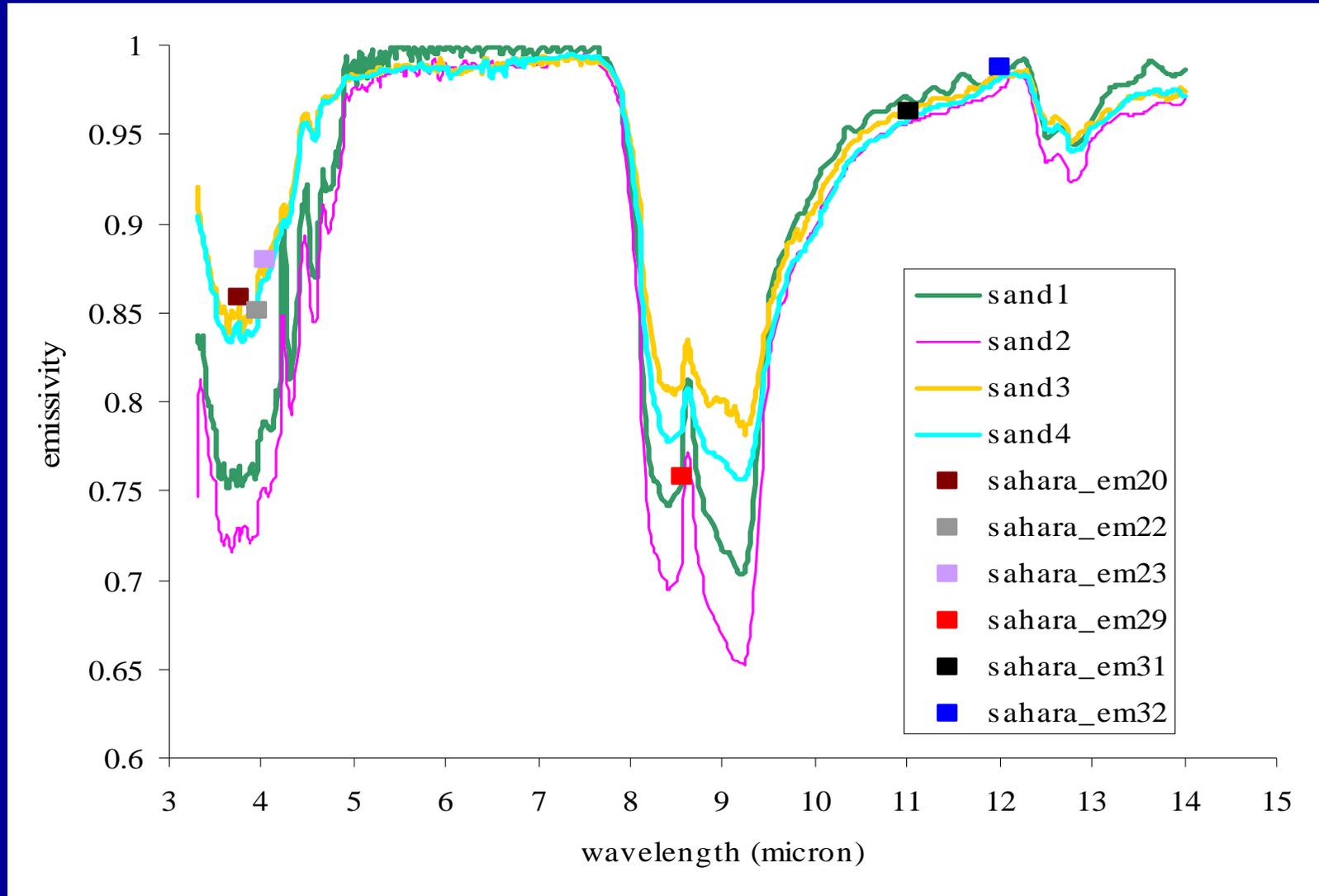


地表温度产品验证结果

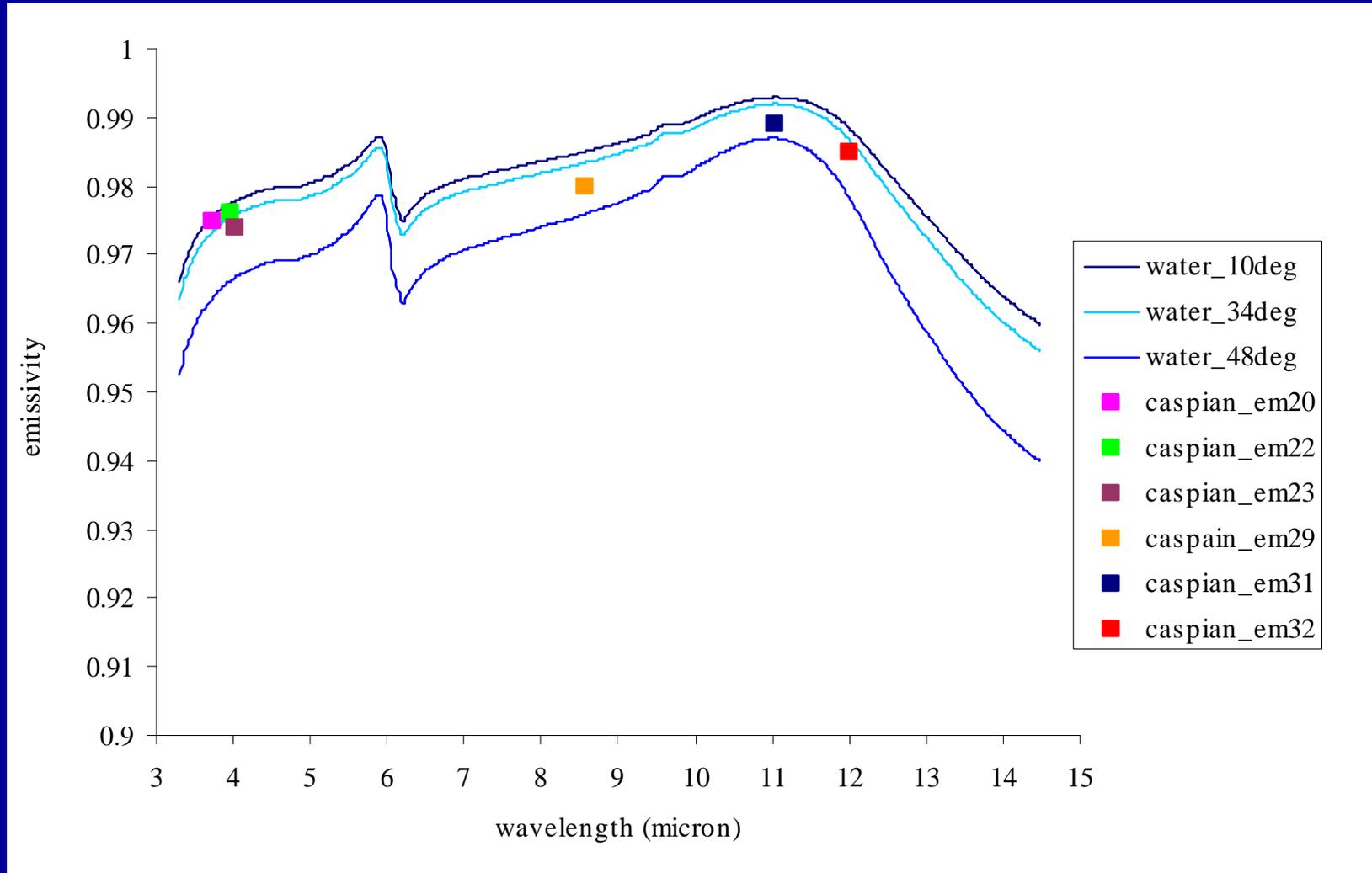


MODIS地表温度验证结果

Compare the retrieved surface emissivities over Sahara Desert to those measured from sand samples in the Lab



Compare the retrieved surface emissivities in Caspian Sea to the calculated water surface emissivities



多光谱地表温度反演小结

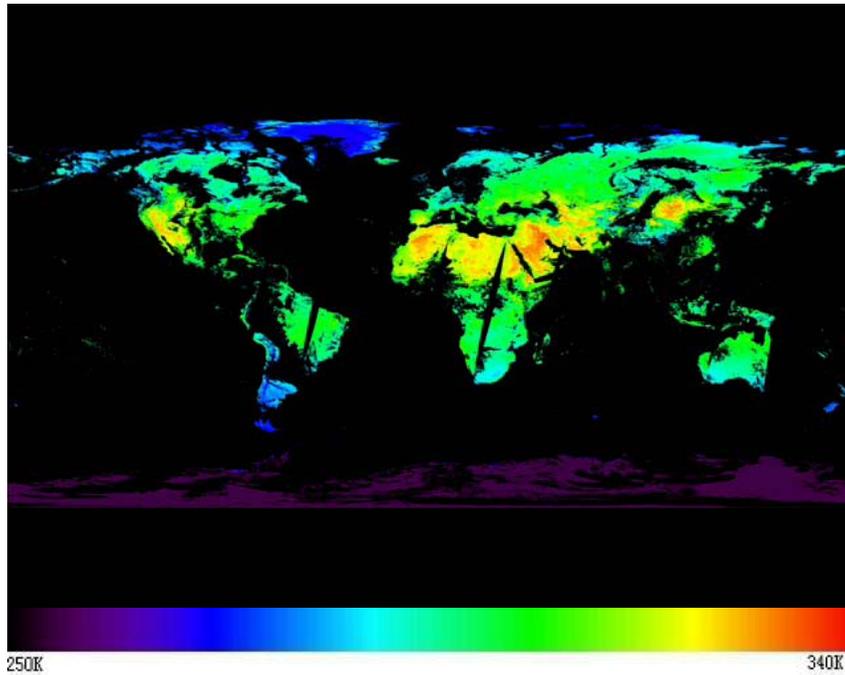
- 大部分情况下地表温度产品的精度可以达到1K
- 现有多光谱传感器地表温度反演方法**近乎完善**，很难再有新的进展

展望

- 进一步开展温度产品的真实性检验
- 发展考虑气溶胶和cirrus影响的地表温度反演算法
- **重点开展如下几方面的研究**

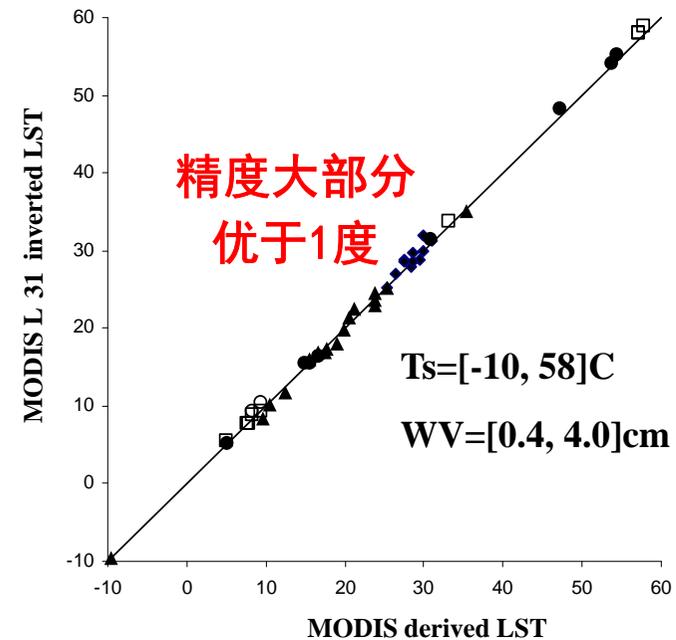
热红外地表温度反演问题与解决途径

MOD11C1全球地表温度产品
(2002.7月-9月)



MODIS 多光谱算法获取的Ts图

地表温度反演验证结果



对给定象元的观测角度和观测时间

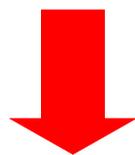
热红外地表温度反演问题与解决途径

问题一

- ◆ 现有**多光谱**传感器光谱信息有限 → 地表温度的精确反演需对 ϵ 事先做出假设或估算；
- ◆ 需要对大气进行精确纠正

解决的可能途径

超光谱波谱分辨率高，信息丰富，可望能为温度和比辐射率的精确分离和反演开辟新途径



热红外超光谱地表温度、比辐射率与大气温湿廓线一体化物理反演

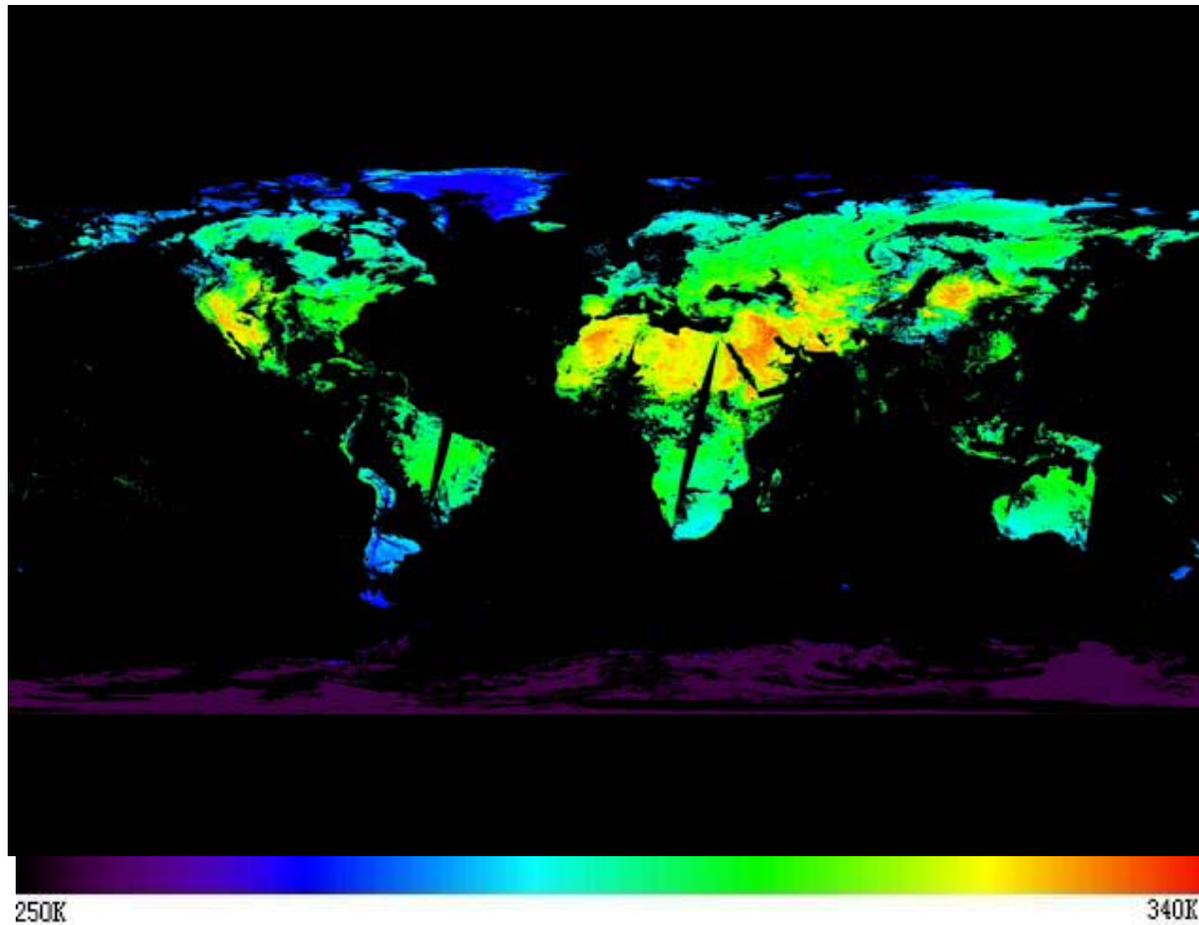
热红外超光谱地表温度、比辐射率 与大气温湿廓线一体化物理反演现状

- 研究尚处于起步阶段
- 信息远未得到充分挖掘和利用
- 反演参数的欠定问题和方程组的病态问题也未从根本上得到解决

一体化物理反演是今后的一个主要研究内容

热红外地表温度反演问题与解决途径

MOD11C1全球地表温度产品（2002.7月-9月）



◆ 有很多缺省数据-云的影响

热红外地表温度反演问题与解决途径

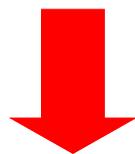
问题二

热红外遥感无法穿透云层获取有云覆盖下的地表温度信息

→ 无法实现对地表温度的全天候监测

解决途径

被动微波遥感受大气干扰小，可穿透云层获取地表热辐射信息，具有全天候、多极化等特点

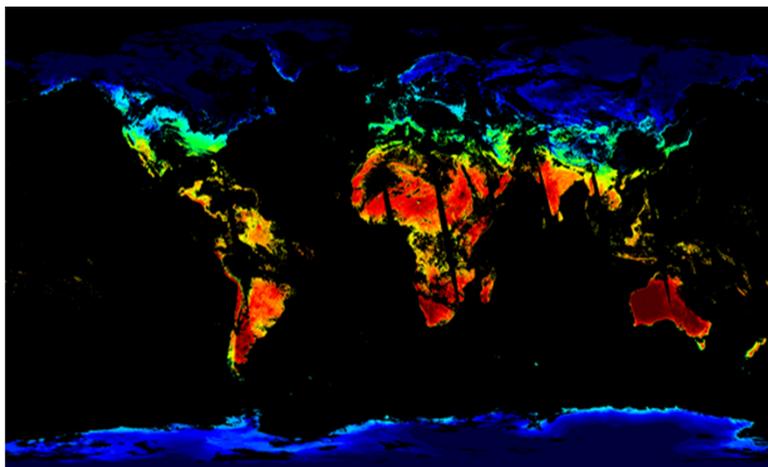


被动微波地表温度物理反演

热红外地表温度反演问题与解决途径

热红外数据

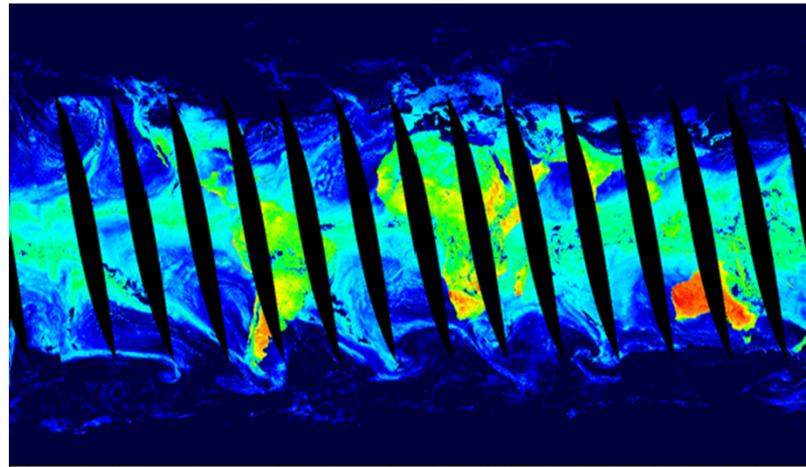
(1) 超光谱地表温度、比辐射率及大气温湿廓线一体化物理反演模型



- 晴天
- 表皮温度

被动微波数据

(2) 被动微波地表温度物理反演模型



- 全天候、多极化
- 具有一定深度的地表表层温度

转换

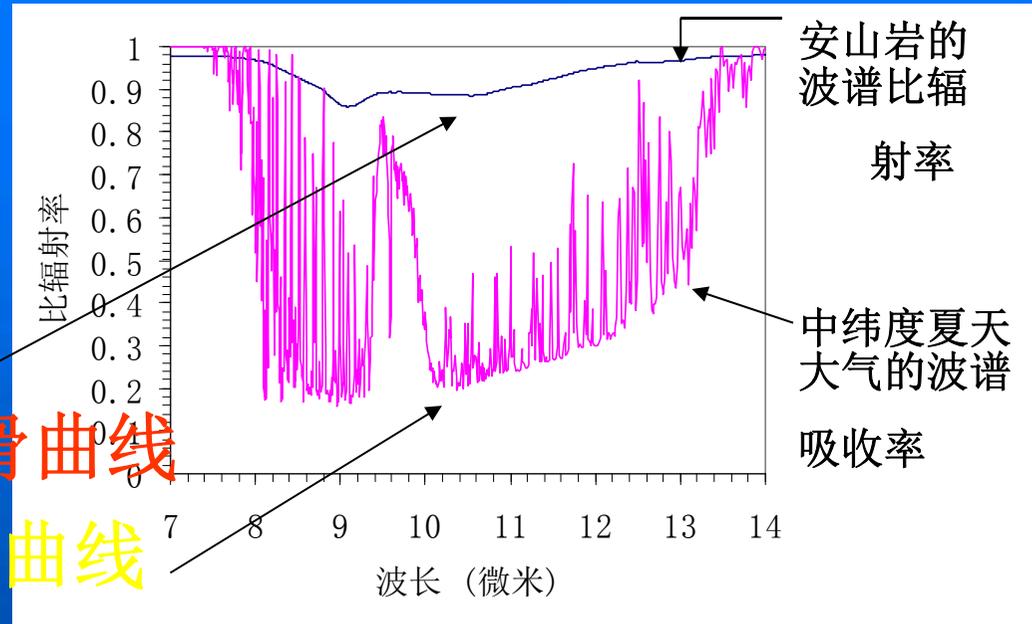


热红外超光谱 T_s 与 ε 反演方法研究

◆ 特点：波谱窄

提供多光谱数据所无法提供的附加物理约束条件

- 👉 地物的波谱 ε 普遍呈光滑曲线
- 👉 大气吸收波谱呈多锯齿曲线



◆ 如何利用地物波谱与大气吸收谱之间的明显差异实现 T_s 与 ε 的准确分离和反演？

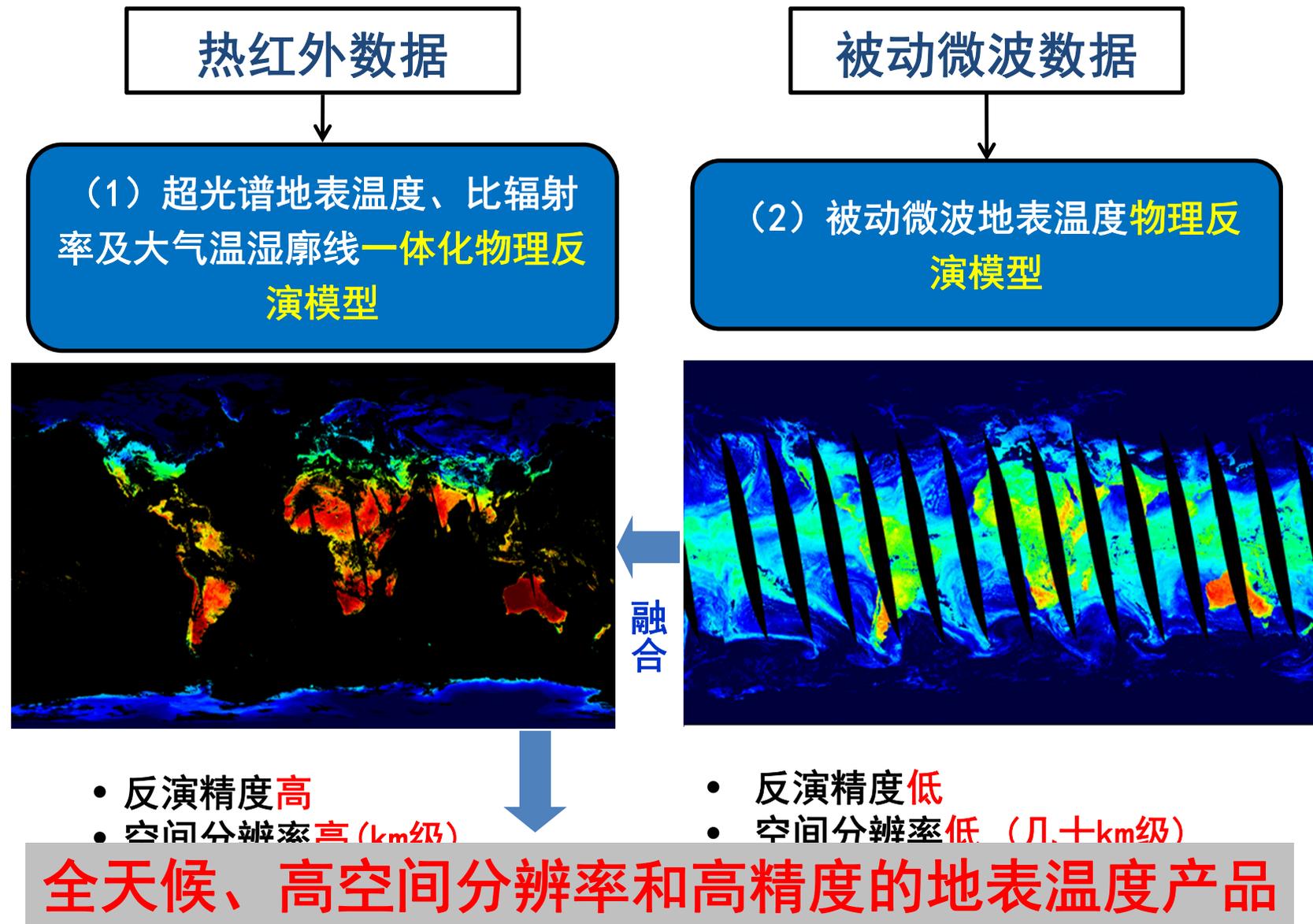
◆ 如何利用热红外超光谱卫星数据的潜在信息进行大气辐射纠正？

被动微波地表温度物理反演现状

- 辐射传输的物理机理认识尚不够明确
- 大部分物理模型做了许多假设和简化，引入一些经验关系来解决反演的欠定问题
- 尚未对地表温度反演作出真实的、完全物理意义的定量描述
- 反演精度低 (~6K)
- 未考虑微波直接反演的温度与地表温度之间的差异

**被动微波地表温度物理反演方法研究
也是今后需要开展的研究内容之一**

被动微波Ts产品与热红外Ts产品融合

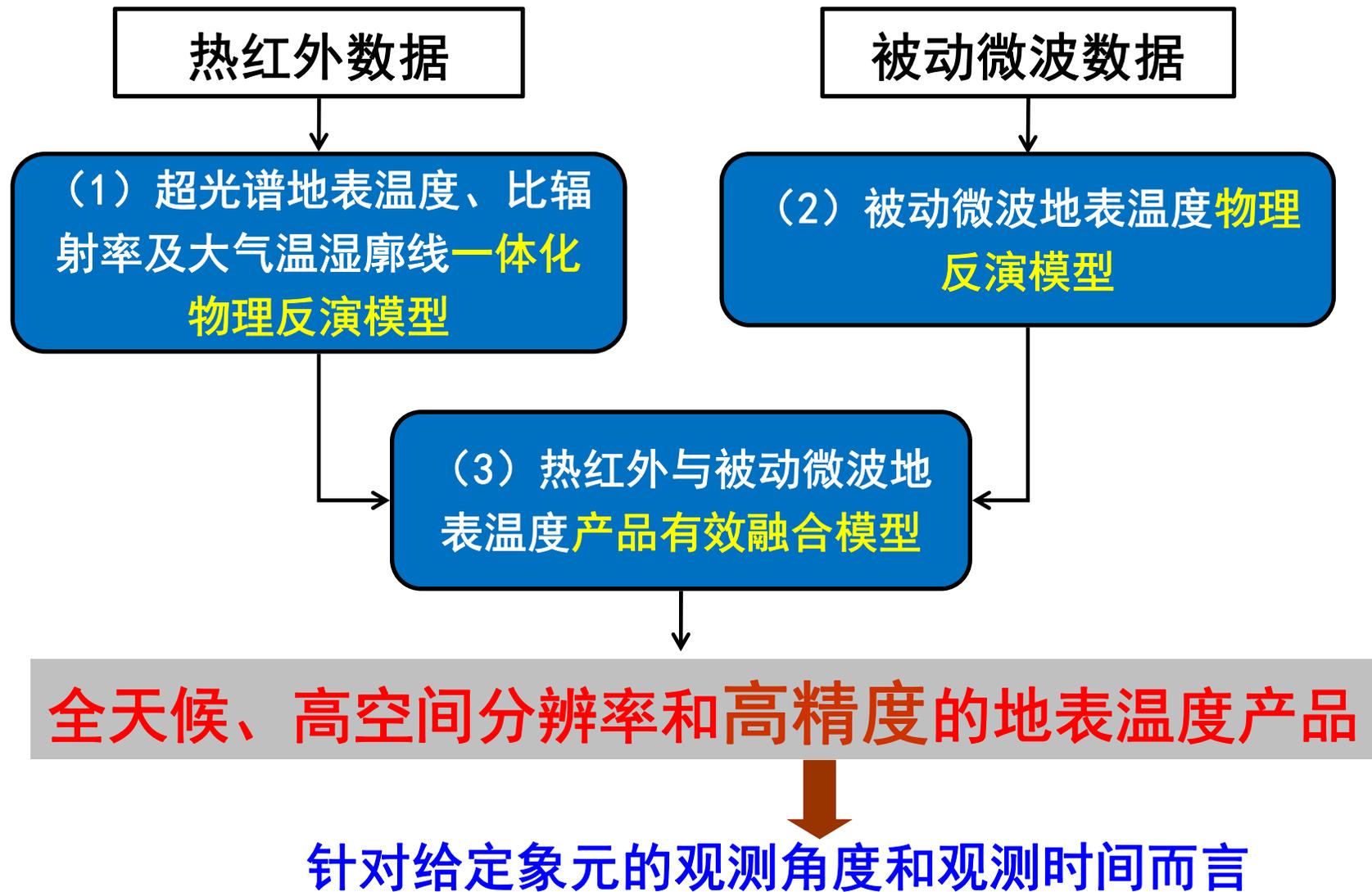


被动微波Ts产品与热红外Ts产品融合

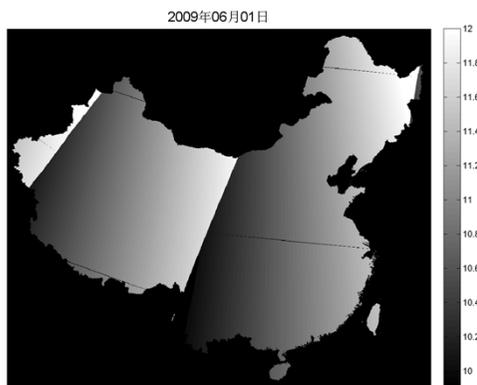
- 现有融合方法都是针对卫星原始数据之间的融合提出来的，目的是提高遥感数据的时空分辨率和参数的反演精度
- 热红外Ts产品与微波Ts产品之间的融合还**未见报道**

**被动微波Ts产品与热红外Ts产品融合方法研究
也是今后需要开展的研究内容**

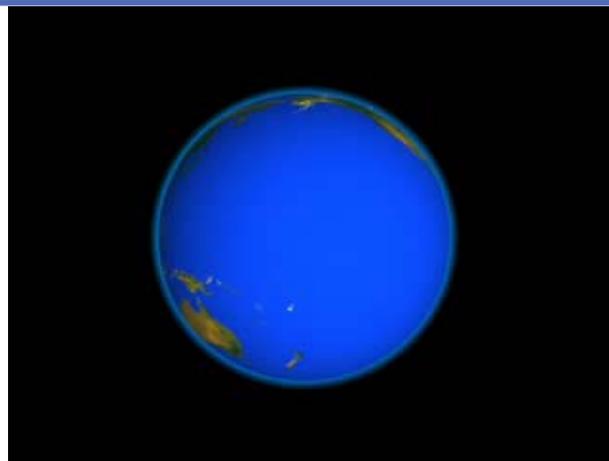
极轨卫星温度产品时间归一化和角度归一化



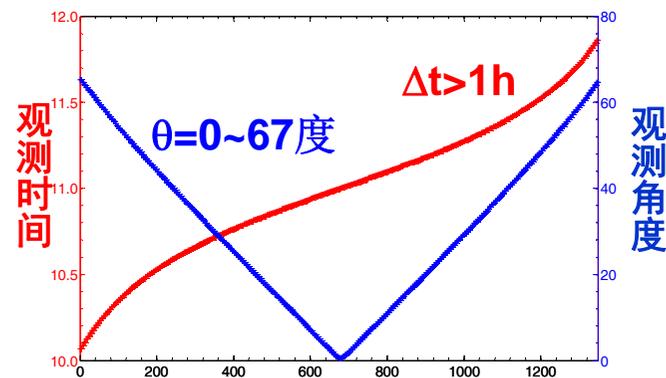
极轨卫星温度产品时间归一化和角度归一化



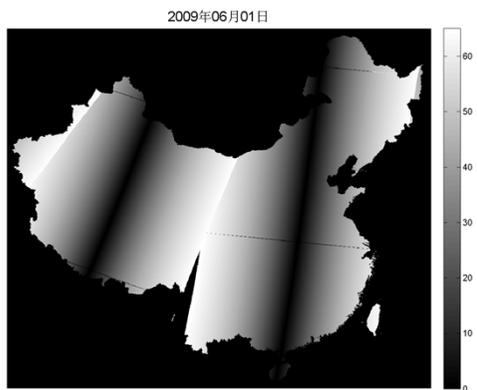
局地观测时间变化图



极轨卫星点扫描成像方式示意图

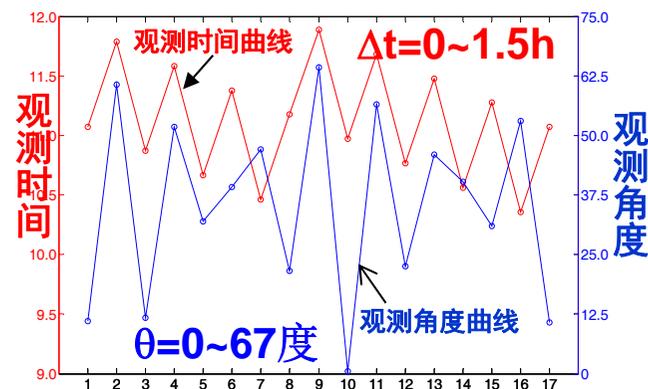


扫描东西向成像时间和观测角

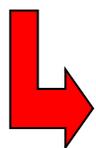


观测角度变化图

同一地物在不同观测时间和不同观测角度得到的温度不同

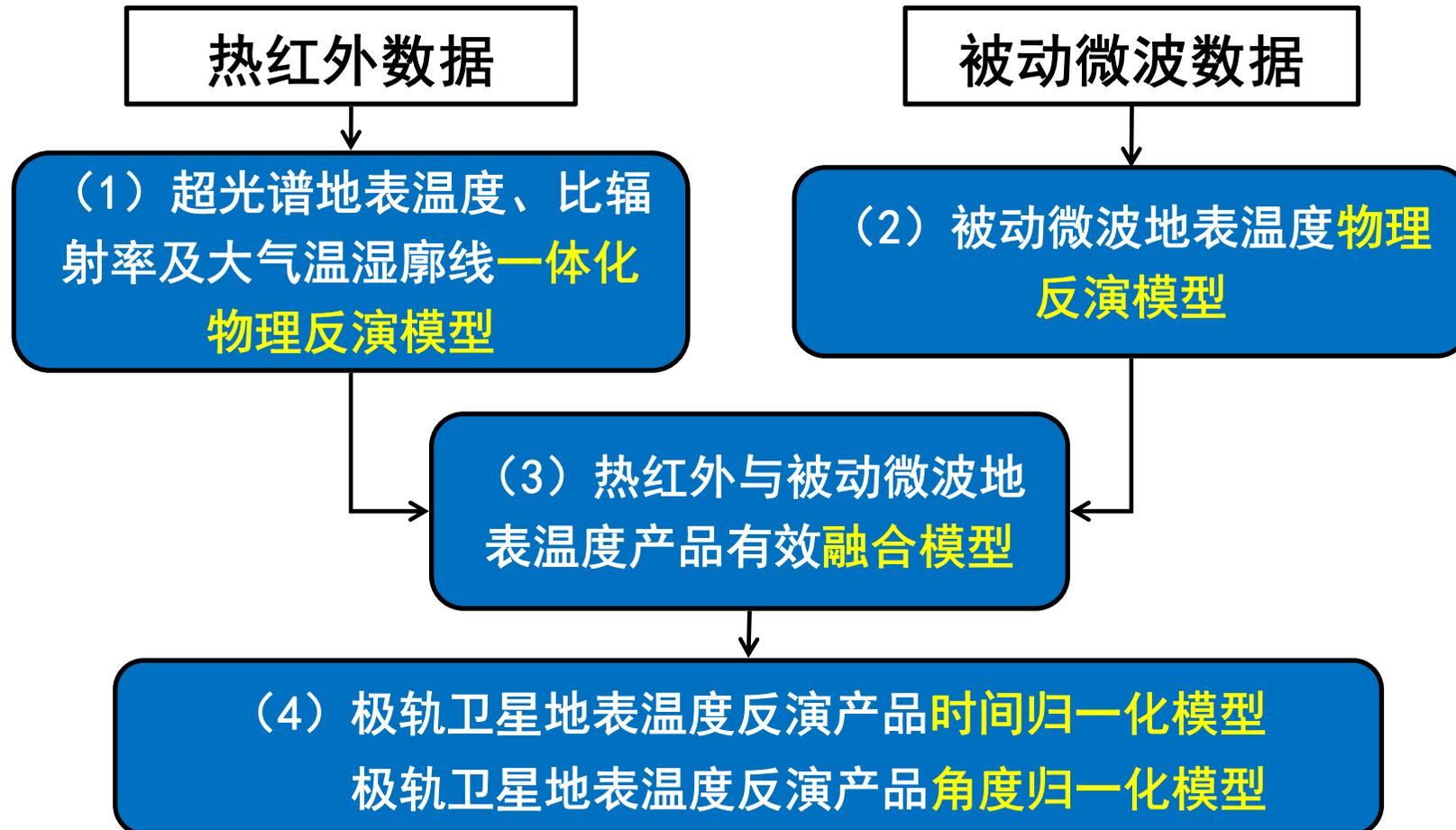


同一地点不同天成像时间和观测角



导致同一天不同地点或不同天同一地点的温度产品之间缺乏可比性，产品应用受到了很大程度的限制

极轨卫星温度产品时间归一化和角度归一化



极轨卫星温度产品时间归一化和角度归一化

现状

在热辐射的方向性解译，地表温度昼夜变化模型等方面开展了一些研究工作，但在极轨卫星地表温度产品的时间归一化与角度归一化研究方面还**未见报道**

极轨卫星Ts反演产品时间归一化和角度归一化方法研究
是今后需要开展的研究内容



区域可比性和时序可比性的、高质量的地表温度
产品

热红外遥感数据提供信息

- Intensity I
 - Spectral I_λ
 - Spatial $I(x,y)$
 - Temporal $I(t)$
 - Angular $I(\theta)$
 - Polarization $I_{v,h}$
- 使用最多: T_s 和 ϵ_λ 反演;
干旱指标; 土壤湿度
- 少: 大气水汽含量反演;
 T_s 和 ϵ_i 反演: 利用2相邻象元
 T_s 不同, ϵ 相同
- 仅两个时刻: 白天/晚上。
 T_s 和 ϵ_i 同时反演; 热惯量估算
- ATSR系列: 2角度
组分温度反演
- 应用很少

联合使用

开展混合象元组分温度提取方法研究

利用多角度+多光谱遥感数据 (ATSR系列卫星)

植被结构参数:

可通过多角度可见光波段数据提取

组分温度:

可通过多角度热红外波段数据
+热辐射传输模型提取

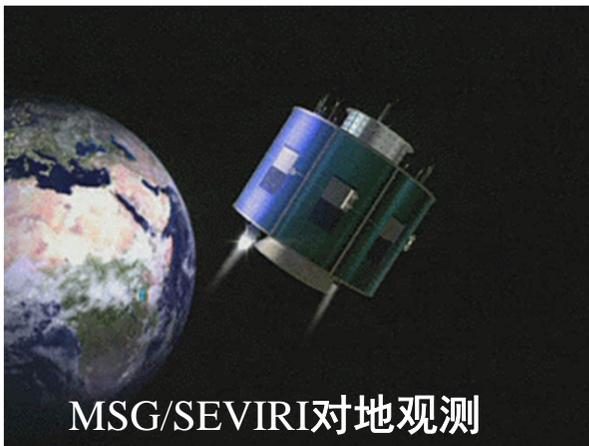
问题

角度只有2个

缺乏可反演的热辐射传输模型

不同角度观测面积大小不同

新一代静止气象卫星Ts反演方法研究



- 高时间分辨率
- 定点连续观测
- 高信噪比



优点： 无需进行时间和角度的归一化处理

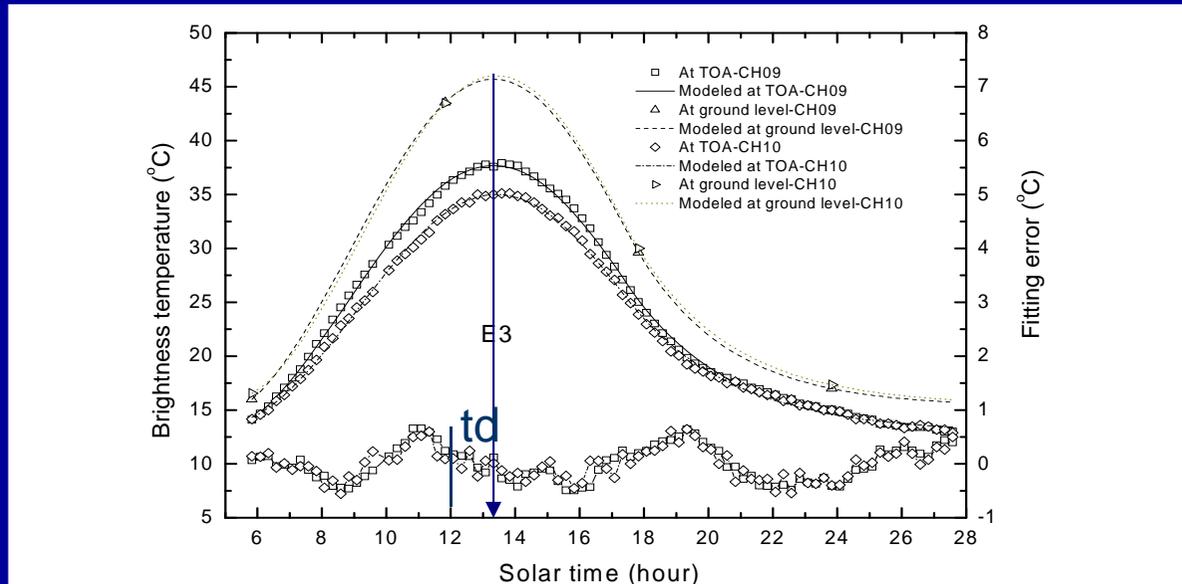
难点

- 缺少像MODIS一样能实时提供地表温度反演所需大气廓线的通道
- 红外通道数有限，MODIS多通道双时相地表温度反演方法失效



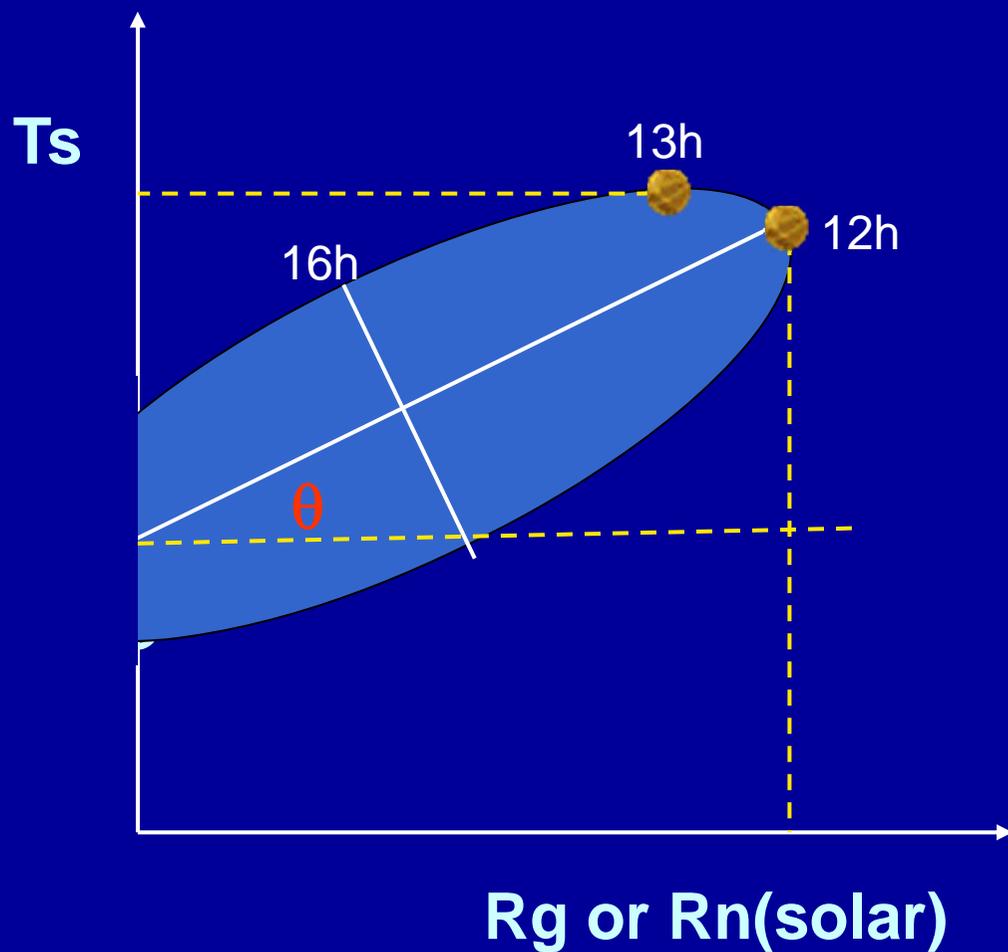
发展多时相多通道地表温度反演算法

开展静止气象卫星多时相数据挖掘研究



- 最大温度出现时间 t_d 、振幅与土壤湿度的关系？
- 夜晚温度变化与热惯量的关系？
- 上午地表温度的变化速率与土壤湿度的关系？
- 云覆盖时段地表温度的变化与土壤湿度和热惯量的关系？
- 植被是如何影响这些关系的？如何消除植被的影响？

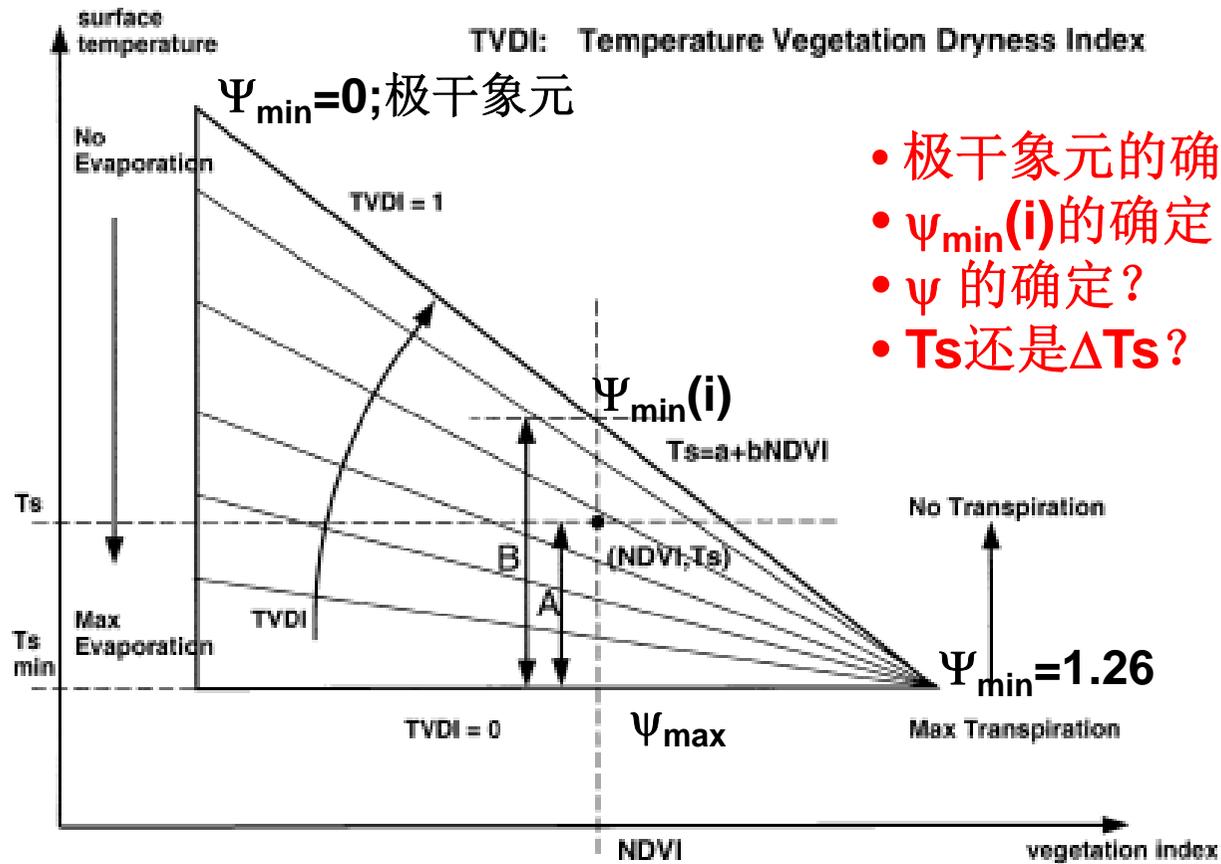
多时相+多光谱（静止气象卫星）卫星数据挖掘



椭圆倾角，
椭圆长、短轴

↓ ? ↓
土壤湿度
植被影响？

多光谱+空间信息的挖掘

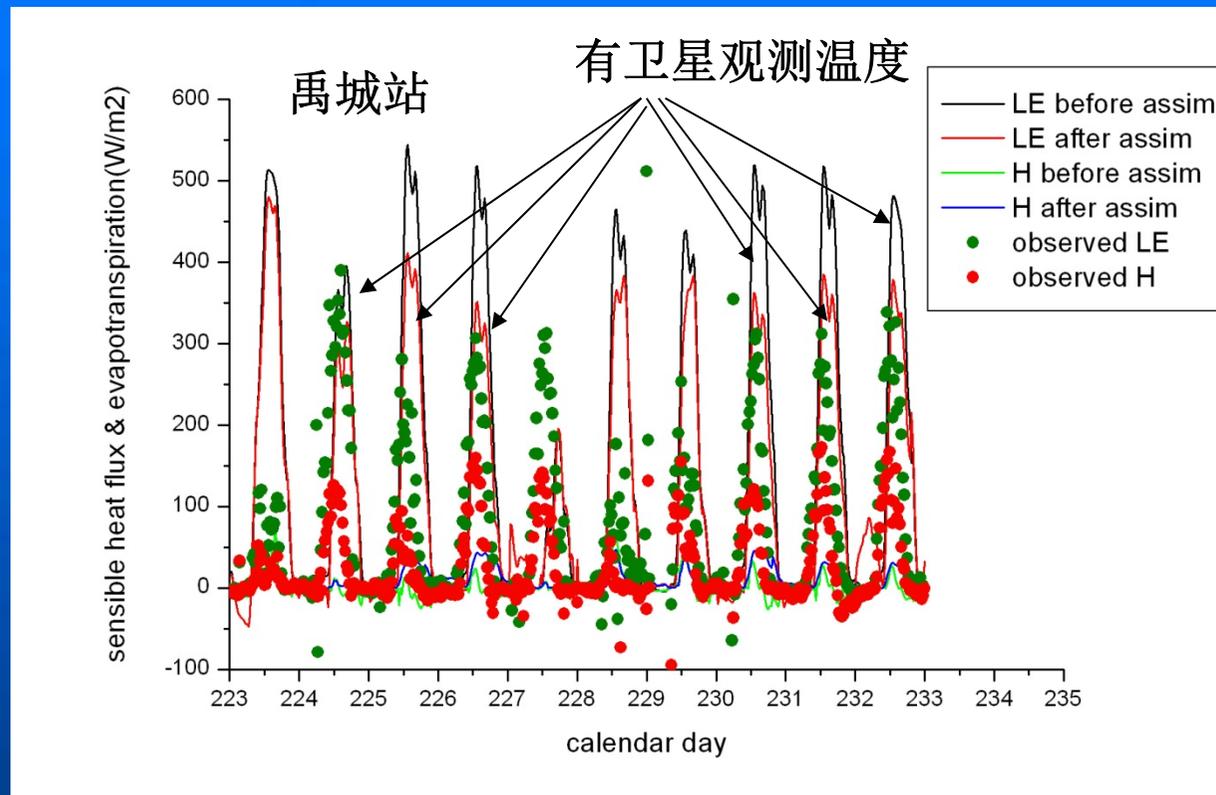


- 极干象元的确定?
- $\Psi_{\min}(i)$ 的确定?
- Ψ 的确定?
- T_s 还是 ΔT_s ?

Fig. 3. Definition of the TVDI. TVDI for a given pixel ($NDVI/T_s$) is estimated as the proportion between lines A and B (see Eq. (1)).

➡ 干旱指标：蒸发比（蒸散发）

陆地表面温度与陆面过程模型同化研究



- 一天有一次卫星观测温度，同化得到的蒸散发结果比同化前要好
- 没有卫星数据进行同化的天，结果几乎没有改善



重新参数化陆面过程：

如何用遥感可反演参数对陆面过程模型进行参数化？

Review Articles

◆ 地表蒸散发遥感估算

Z.-L. Li, R.L. Tang, Z. Wan, Y. Bi, C. Zhou, B.-H. Tang, G.J. Yan and X. Zhang, (2009), A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. *Sensors*, 9: 3801-3853. doi:10.3390/s90503801

◆ 地表比辐射率反演

Z.-L. Li, H. Wu, N. Wang, Q. Shi, J.A. Sobrino, Z. Wan, B.-H. Tang, and G.J. Yan, (2013), Land surface emissivity retrieval from satellite data. *International Journal of Remote Sensing*. 34(9-10): 3084-3127
doi:10.1080/01431161.2012.716540

◆ 地表温度反演

Z.-L. Li, B.-H. Tang, H. Wu, H. Ren, G.J. Yan, Z. Wan, I.F. Trigo and J. Sobrino, (2013), Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*. 131: 14-37.
doi:10.1016/j.rse.2012.12.008